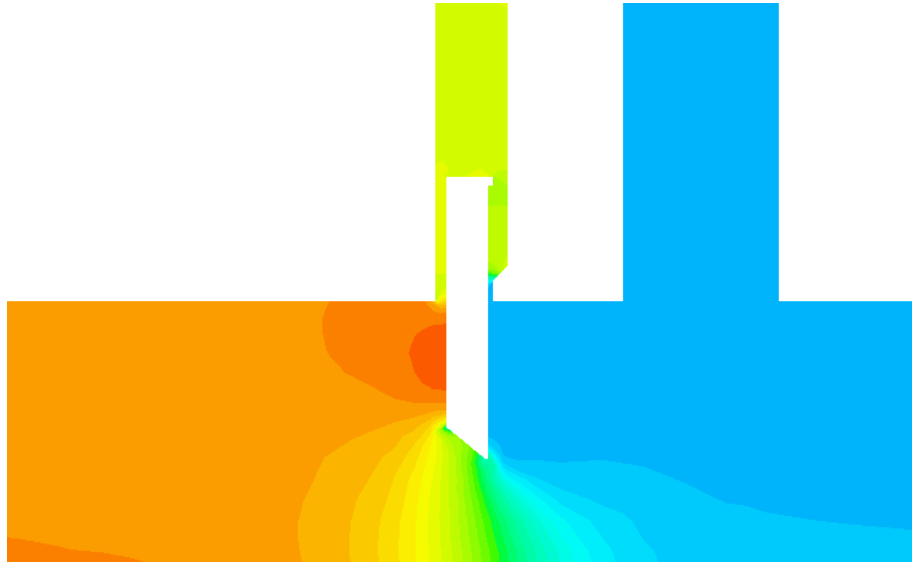




ISEL

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA
Departamento de Engenharia Mecânica



Esforços Hidrodinâmicos em Comportas Verticais (Downpull)

JOÃO PEDRO HENRIQUES DA SILVA
(Licenciado em Engenharia Mecânica)

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre
em Engenharia Mecânica

Orientadores:

Eng. José Manuel Varandas Martins
Prof. Doutor Jorge Mendonça e Costa

Júri:

Presidente: Prof. Doutor João Carlos Quaresma Dias
Vogais:

Prof. Doutor José Maria André
Prof. Paulo de Santamaria de Sousa Tavares Gouveia
Eng. José Manuel Varandas Martins
Prof. Doutor Jorge Mendonça e Costa

Setembro de 2011

Resumo

O *downpull* é uma força gerada pelo efeito do escoamento em comportas planas com estanquidade a jusante e pode condicionar, de forma determinante, o dimensionamento do órgão de manobra e a preponderância de fecho de uma comporta vertical em condições de emergência.

Neste trabalho é desenvolvido um modelo de cálculo analítico para a obtenção do *downpull* e um modelo de simulação numérica com *Computational Fluid Dynamics* (CFD). O modelo analítico desenvolvido foi exposto numa folha de cálculo e permite a obtenção de resultados em poucos minutos, factor essencial sob o ponto de vista económico. O modelo em CFD tem como principal objectivo a validação do modelo analítico. Sendo um modelo mais complexo e dispendioso em termos de tempo despendido, apenas poderá ser utilizado em situações pontuais que exijam um maior rigor nos resultados obtidos.

Palavras-chave

Downpull, Forças Hidrodinâmicas, Comportas verticais, Comporta vagão

Abstract

Hydraulic downpull on downstream seal, roller-mounted gates located in entrance transitions of large ducts is generated by the reduction of pressures on the bottom of a gate when water flows under it. These forces can have a significant impact on the operating effort and the gate ability to close in an emergency.

In this document an analytical model for calculation of downpull is developed and a numerical simulation method with Computational Fluid Dynamics (CFD) was also used. The analytical model developed produces results in few minutes, which is essential for quick geometry definition. The CFD model had the primary objective to validate the analytical results, because it is complex and may take several days to generate results.

Keywords

Downpull, Hydrodynamic force,

Agradecimentos

Agradeço às empresas Kymaner – Tecnologias Energéticas Lda. e LTU – Luís Trigo Unipessoal Lda. que me facultaram a oportunidade de desenvolver um trabalho com aplicação prática e com um papel fundamental na segurança das barragens, pela disponibilização de todos os recursos necessários à execução deste trabalho e a todos os seus colaboradores pelo apoio e motivação.

Agradeço ao engenheiro José Varandas pela orientação deste trabalho, pela disponibilidade e por todo o conhecimento e experiência transmitida, fundamentais para o ingresso no mercado de trabalho.

Ao professor Jorge Mendonça e Costa agradeço a orientação e ajuda dadas ao longo deste trabalho, a experiência transmitida, a disponibilidade sempre demonstrada e todas as palavras de incentivo.

Agradeço ao engenheiro Luís Trigo pelo acompanhamento em algumas das fases deste trabalho, pela experiência transmitida e pela disponibilidade demonstrada.

Ao professor José Chaves Pereira e ao Pedro Neto agradeço a ajuda e disponibilidade no desenvolvimento do modelo em CFD.

Agradeço aos meus amigos e colegas de curso, Eunice, Emanuel e Luís, por todos os momentos que passámos juntos, pelas horas de estudo, de trabalho e de diversão, foram fundamentais para que chegasse até aqui.

A todos os meus amigos um muito obrigado pela vossa amizade, pela companhia, pelo apoio, pela compreensão e pela motivação que sempre me transmitiram, vocês são fundamentais para mim. Em especial, a Marisa, a Célia, o Miguel, a Carmen e a Sílvia.

Agradeço ao meu irmão Marco toda a amizade e apoio sempre demonstrados.

Por fim, aos meus pais Alberto e Mariana, a eles devo tudo o que sou e agradeço todo o apoio e incentivo recebido ao longo de toda a minha vida bem como toda a amizade e amor sempre demonstrados.

Índice

1. Introdução.....	2
1.1. Enquadramento do tema	2
1.2. Motivação e objectivos	2
1.3. Estrutura do trabalho	3
2. Estado da arte	6
2.1. Definição de <i>downpull</i>	6
2.2. A importância do <i>downpull</i>	6
2.3. Principais parâmetros de influência do <i>downpull</i>	7
2.3.1. Geometria da face inferior.....	7
2.3.2. Folgas a montante e jusante da comporta	9
2.3.3. Espessura da comporta e chapa de face	9
2.4. Comporta vagão	10
3. Modelo analítico	14
3.1. Forças hidrodinâmicas.....	14
3.1.1. Balanço de forças	15
3.1.2. Cálculo da velocidade	17
3.1.3. Coeficientes do <i>downpull</i>	18
3.1.4. Tipo de escoamento adoptado no modelo	24
4. Modelo numérico em CFD com volumes finitos.....	26
4.1. Desenvolvimento do modelo	26
4.2. Modelo final	27
5. Validação dos modelos utilizados	32
5.1. Geometria da comporta	32
5.2. Análise dos ensaios apresentados no artigo	33
5.2.1. Modelo experimental.....	33
5.2.2. Modelo em CFD com elementos finitos	35
5.3. Modelo analítico	35
5.4. Modelo em CFD com volumes finitos	37
5.5. Apresentação e análise de resultados.....	42
5.6. Análise de sensibilidade	44
5.6.1. Resumo da análise de sensibilidade.....	45

5.7. Conclusões	45
6. Caso de estudo real.....	48
6.1. Geometria da comporta	48
6.2. Cálculo	51
6.2.1. Modelo analítico	51
6.2.2. Modelo em CFD com volumes finitos	52
6.3. Análise de resultados.....	60
7. Conclusões e Trabalhos Futuros	64
7.1. Conclusões	64
7.2. Desenvolvimentos futuros.....	66
Referências Bibliográficas	67

Índice de Figuras

Figura 2.1 – Tipos de faces inferiores.....	8
Figura 2.2 – Tipos de faces inferiores que dispõem de dados experimentais	8
Figura 2.3 – Posição do cutelo	10
Figura 2.4 – Exemplo de comporta vagão	11
Figura 3.1 – Representação dos parâmetros geométricos envolvidos no cálculo do <i>downpull</i> – cutelo a jusante.....	14
Figura 3.2 - Representação dos parâmetros geométricos envolvidos no cálculo do <i>downpull</i> – cutelo em posição intermédia	15
Figura 3.3 – Áreas de aplicação das componentes do <i>downpull</i>	15
Figura 3.4 – Representação da separação do fluido da superfície inferior da comporta.....	16
Figura 3.5 – Variação do K_b com a abertura da comporta de acordo com os parâmetros apresentados [5]	19
Figura 3.6 – Variação do K_b com a abertura da comporta de acordo com os parâmetros apresentados [5]	19
Figura 3.7 – Variação do K_b com a abertura da comporta de acordo com os parâmetros apresentados [5]	20
Figura 3.8 – Variação do K_b com a abertura da comporta de acordo com os parâmetros apresentados	20
Figura 3.9 – Gráfico digitalizado	21
Figura 3.10 – Pontos para obtenção da curva e respectiva equação	21
Figura 3.11 – Gráfico final	22
Figura 3.12 – Demonstração de interpolação	23
Figura 4.1 – Geometria tipo	27
Figura 4.2 – Representação dos volumes iniciais de água (vermelho) e ar (azul)	29

Figura 4.3 – Representação da pressão inicial	29
Figura 5.1 – Dimensões da conduta e ranhura da comporta [2]	32
Figura 5.2 – Dimensões da comporta [2]	33
Figura 5.3 – Estrutura de ensaios [2]	33
Figura 5.4 – Estrutura na zona da comporta [2]	34
Figura 5.5 – Resultados do modelo reduzido [2]	34
Figura 5.6 – Resultados da análise com elementos finitos [2]	35
Figura 5.7 – Geometria para análise com CFD – dimensões gerais.....	37
Figura 5.9 – Malha de volume.....	39
Figura 5.10 – Volume de água e ar.....	40
Figura 5.11 – Velocidade – perfil longitudinal (escalar).....	40
Figura 5.12 – Velocidade (vector)	41
Figura 5.13 – Pressão.....	41
Figura 5.14 – Comparação de resultados	43
Figura 5.15 – Análise de sensibilidade para variação da folga de montante	44
Figura 5.16 – Análise de sensibilidade para variação do ângulo da face inferior...	45
Figura 6.1 – Geometria real da conduta.....	49
Figura 6.2 – Geometria real da comporta	49
Figura 6.3 – Geometria da conduta simplificada.....	50
Figura 6.4 – Geometria da comporta simplificada.....	50
Figura 6.5 – Malha de volume.....	53
Figura 6.6 – Volume de água e ar.....	53
Figura 6.7 – Pressão.....	54
Figura 6.8 – Pressão – zona envolvente à comporta	54
Figura 6.9 – Velocidade (escalar)	55
Figura 6.10 – Velocidade (vectorial).....	55

Figura 6.11 – Malha de volume	57
Figura 6.12 – Volume de água e ar	57
Figura 6.13 – Pressão	58
Figura 6.15 – Velocidade (escalar)	59
Figura 6.16 – Velocidade (vectorial)	59
Figura 6.17 – Gráfico com resumo de resultados	61

Índice de Tabelas

Tabela 5.1 – Dados para o cálculo do <i>downpull</i>	36
Tabela 5.2– Força <i>downpull</i> artigo	36
Tabela 5.3 – Comparação de resultados	42
Tabela 6.1 – Dados para o cálculo do <i>downpull</i>	51
Tabela 6.2 – Valores do <i>downpull</i>	52
Tabela 6.3 – Resultados dos ensaios do modelo simplificado	56
Tabela 6.4 – Resultados dos ensaios do modelo real.....	60
Tabela 6.5 – Resultados obtidos.....	60

Lista de Símbolos

Símbolos

Símbolo	Significado
A	Área da conduta
a''_2	Folga entre vedação e recesso
a'_2	Folga no recesso
A_1	Área de montante da folga no poço da comporta
a_1	Folga a montante entre
A_2	Área de jusante da folga no poço da comporta
a_2	Folga a jusante
A_s	Área da projecção horizontal da vedação superior
B	Largura da comporta em carga
B_0	Largura da conduta
C_1	Coeficiente de contracção entre o poço e a comporta a montante
C_2	Coeficiente de contracção entre o poço e a comporta a jusante
C_c	Coeficiente de contracção na zona contraída a jusante da comporta
C_c''	Coeficiente de contracção no recesso
C_e	Coeficiente para perdas de carga na entrada da conduta
d	Espessura da comporta
d'	Espessura da chapa de face
e	Altura do cutelo
F_d	Força Downpull
g	Aceleração da gravidade
H	Altura da coluna de água
H_e	Perdas de carga na entrada
K_b	Coeficiente para a forma da face inferior
K_t	Coeficiente de incidência da carga na face superior
Q	Caudal total
Q'	Caudal sob a comporta
Q''	Caudal sobre a comporta
r	Raio a montante na face inferior da comporta

V_0	Velocidade na conduta para o caudal máximo
V_j	Velocidade na zona contraída a jusante da comporta
y	Altura entre o fundo da conduta e face inferior da comporta
Y_0	Altura da conduta
α'_2	Coeficiente de forma do recesso
θ	Ângulo da face inferior com a horizontal
ρ	Massa volúmica da água
ε_{ce}	Coeficiente de perdas provocado pela geometria da comporta na zona superior da conduta imediatamente a montante da comporta.
Δp	Variação de pressão
$\Delta p/y$	Pressão imediatamente a jusante da comporta

CAPÍTULO

1

Introdução

Neste capítulo efectua-se o enquadramento do tema, dando especial relevo à sua importância no sector da energia hidroeléctrica. Apresentam-se, também, a motivação e objectivos para a realização deste trabalho e a estrutura adoptada.

1. Introdução

1.1. Enquadramento do tema

O presente trabalho foi desenvolvido em colaboração com a Kymaner - Tecnologias Energéticas Lda. e a LTU - Luís Trigo Unipessoal Lda. e o seu tema surge na sequência do Programa Nacional de Barragens com Elevado Potencial Hidroeléctrico, que prevê aumentar o potencial de hidroelectricidade utilizado de 46% em 2010 para 70% até 2020 [1], do qual a LTU está a realizar o projecto de equipamentos hidrodinâmicos de alguns dos empreendimentos envolvidos. Um dos equipamentos principais das barragens são as comportas verticais, que estão sujeitas a grandes esforços hidrodinâmicos. As empresas colaboradoras já dispunham de um modelo de cálculo para os esforços hidrodinâmicos, mas pretendiam o desenvolvimento de um modelo de raiz, de modo a não condicionar a pesquisa de referências sobre o tema.

1.2. Motivação e objectivos

A determinação das forças hidrodinâmicas nas comportas verticais é fundamental para o cálculo do esforço de manobra a que uma comporta está sujeita. O esforço de manobra contempla as forças hidrodinâmicas provocadas pelo escoamento e geometria da comporta (*downpull*), pelo peso próprio e equipamento de suspensão, pelas forças de atrito entre superfícies (para garantir a estanquidade lateral e frontal) e pelas forças de atrito de rolamento (na chumaceira da roda e da roda no carril), sendo que a componente do *downpull* é a única em estudo neste trabalho.

A determinação desta força apresenta alguma complexidade, pelo que nos casos em que a comporta representa um elemento de extrema importância na segurança da estrutura são por vezes realizados ensaios em modelo reduzido, não havendo uma total confiança nos modelos analíticos existentes.

Devido aos custos associados aos ensaios em modelo reduzido, os seus resultados têm sido comparados com simulações numéricas de escoamentos com base em *software* de elementos finitos e de volumes finitos [2] [3] [4], de modo a que a determinação do *downpull* possa vir a ser realizada exclusivamente com recurso a modelos numéricos, diminuindo, significativamente, os custos.

Os *softwares* comerciais existentes apresentam, como grande vantagem, a fácil alteração da geometria, de modo a otimizar o modelo e obter os valores pretendidos para a força *downpull*, o que no modelo reduzido implicaria a construção de um novo modelo.

O modelo analítico existente [5] [6] utiliza dados experimentais e envolve muitos parâmetros sendo alguns deles associados a um determinado tipo de geometria e escoamento, o que implica, em alguns casos, recorrer a aproximações e noutros torna-se mesmo impossível a obtenção dos seus valores.

Assim sendo, o primeiro objectivo deste trabalho é estabelecer um procedimento de cálculo analítico fiável (baseado em bibliografia de referência), e expô-lo numa folha de cálculo, de modo a permitir um cálculo automático, rápido e preciso.

Um segundo objectivo é a construção e análise de um modelo tridimensional, com recurso a *software* de análise de escoamentos por volumes finitos (*Computational fluid dynamics* - CFD) para posterior comparação e análise de resultados entre os dois modelos.

A motivação era, à partida, bastante elevada, dado que é um trabalho com aplicação prática a curto prazo e de grande importância na segurança das barragens.

1.3. Estrutura do trabalho

O trabalho desenvolvido encontra-se organizado em sete capítulos distintos:

Capítulo 1: “Introdução”. Neste capítulo efectua-se o enquadramento do tema dando especial relevo à sua importância no sector da energia hidroeléctrica. Apresentam-se, também, a motivação e objectivos para a realização deste trabalho e a estrutura adoptada.

Capítulo 2: “Estado da arte”. Neste capítulo é efectuada uma revisão bibliográfica, onde são apresentados os conceitos e os principais parâmetros do *downpull*. Apresenta-se, também, uma breve descrição da comporta vagão, que está, normalmente, sujeita ao *downpull*.

Capítulo 3: “Modelo analítico”. Neste capítulo são apresentadas as fórmulas para o cálculo do *downpull* e dos seus parâmetros, assim como o procedimento para o processamento de gráficos que permitiram o desenvolvimento do modelo de cálculo analítico numa folha de cálculo.

Capítulo 4: “Modelo com base em volumes finitos”. Neste capítulo é descrita a evolução da elaboração do modelo de simulação numérica em CFD e as características do modelo final que serviu de base à realização dos ensaios.

Capítulo 5: “Validação dos modelos utilizados”. Neste capítulo é efectuada a comparação entre os resultados obtidos por um modelo experimental e um modelo CFD bidimensional com o modelo analítico e o modelo CFD tridimensional expostos no capítulo 3 e capítulo 4, respectivamente, com o objectivo de comparar e validar os modelos desenvolvidos no âmbito deste trabalho.

Capítulo 6: “Caso de estudo real”. Neste capítulo é analisada uma comporta em fase de projecto com dimensões reais. Efectua-se a comparação entre o modelo analítico e o modelo CFD para uma geometria simplificada e entre a geometria simplificada e a geometria real com o modelo em CFD.

Capítulo 7: “Conclusões e trabalhos futuros”. Neste capítulo apresentam-se as principais conclusões obtidas com a realização deste trabalho e indicam-se possíveis pontos e temas a desenvolver no futuro.

CAPÍTULO

2

Estado da arte

Neste capítulo é efectuada uma revisão bibliográfica, onde são apresentados os conceitos e os principais parâmetros do downpull. Apresenta-se, também, uma breve descrição da comporta vagão, que está, normalmente, sujeita ao downpull.

2. Estado da arte

2.1. Definição de *downpull*

Para começar, é importante perceber o que é a força *downpull*. A força *downpull* é uma força hidrodinâmica que surge sempre que uma comporta se movimenta entre as posições extremas, dado que em qualquer posição intermédia existe escoamento. O escoamento leva a um aumento da velocidade do fluido e origina uma diminuição da pressão na face inferior da comporta, provocada pela conversão da energia potencial em energia cinética e pela mudança de direcção do escoamento [7]. A diferença de pressões entre a face inferior e face superior da comporta origina uma força vertical no sentido descendente, denominada *downpull*.

2.2. A importância do *downpull*

A determinação do *downpull* assume um papel extremamente importante no cálculo do esforço de manobra de uma comporta, estando directamente associado ao custo dos sistemas de movimentação das mesmas.

Nas comportas que têm por função o fecho em carga em casos de emergência, o *downpull* é mais uma vez fundamental para garantir a preponderância de fecho necessária e a segurança das instalações. Nestas situações um mau dimensionamento pode provocar o efeito oposto *uplift*, ou seja, uma impulsão da comporta para cima.

Contudo o *downpull* não é “uma doença para ser curada ou eliminada”, é uma ferramenta muito útil para o projectista, para que se possa assegurar o fecho por gravidade em casos de emergência. Quando o fecho de emergência não é requerido a redução do *downpull* não deve ser o principal objectivo, é necessário ter em conta os problemas de cavitação e vibrações. [8]

Os primeiros estudos sobre o *downpull* foram publicados nos anos 50 e 60 por Khalturina (1954), Colgate (1959) e Naudascher (1957, 1959, 1964), sendo, até esta época, efectuado o cálculo do *downpull* recorrendo apenas a ensaios experimentais [5] [9]. Os modelos foram otimizados ao longo dos anos e utilizados num grande número de comportas, sendo a sua fiabilidade comprovada com a comparação com ensaios experimentais. A precisão dos modelos de cálculo analíticos era tal, que “quando se verificava uma discrepância entre os resultados experimentais e analíticos, uma análise rigorosa revelava que os dados experimentais estavam errados” [5].

Os modelos de cálculo do *downpull* disponíveis consideram um escoamento estacionário para posições fixas, não verificando as condições de movimento. Em casos de movimentações rápidas, como é o caso do fecho de emergência, as pressões podem ser diferentes dos valores obtidos para posições fixas [9].

Amir Khosrojerdi verificou em 2009 que o *downpull* varia com a velocidade de movimentação da comporta, tendo para isso efectuado a análise de uma comporta com *software* de CFD. Os ensaios realizados permitiram concluir que o *downpull* é influenciado pela velocidade de movimentação e pelo facto de a comporta estar a subir ou a descer [4].

As fórmulas de cálculo dos diversos parâmetros do *downpull* serão apresentadas mais à frente no capítulo 3.

2.3. Principais parâmetros de influência do *downpull*

2.3.1. Geometria da face inferior

Tal como referido anteriormente, o escoamento sob a comporta provoca um aumento da velocidade nesta zona, que por sua vez implica uma redução da pressão. A influência da pressão na face inferior é função da sua geometria e da percentagem de abertura da comporta e é reflectida no *downpull* através do coeficiente K_b (este coeficiente reflecte a influência da geometria da face inferior no cálculo do *downpull*). Existem, no entanto, muitas configurações possíveis para

a face inferior, dado que estas podem conter, ou não, uma face inclinada de ângulo variável, um raio na aresta de montante e cutelo a jusante, ou numa posição intermédia. Na Figura 2.1 podem observar-se alguns tipos de faces inferiores.

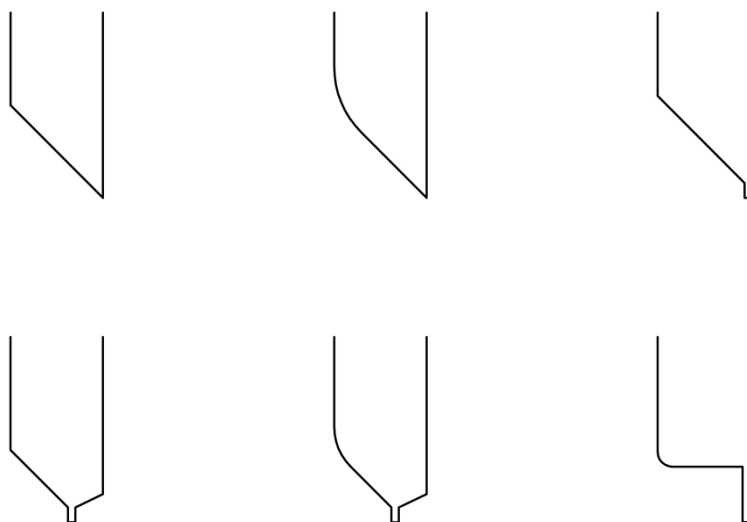


Figura 2.1 – Tipos de faces inferiores

O coeficiente K_b é obtido através de gráficos construídos com base em inúmeros ensaios experimentais, que abrangem uma gama limitada de comportas (Figura 2.2).

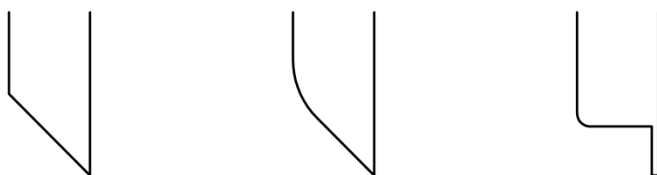


Figura 2.2 – Tipos de faces inferiores que dispõem de dados experimentais

Pelo que, por vezes, se torna necessário efectuar interpolações de modo a obter a curva representativa de K_b mais indicada.

Tal como já foi referido anteriormente, a definição da geometria da face inferior não pode ser feita apenas com o objectivo de controlar o *downpull*, é necessário ter em conta possíveis problemas de cavitação, vibrações e alteração dos valores do coeficiente de descarga. [8]

2.3.2. Folgas a montante e jusante da comporta

A dimensão da folga a montante da comporta permite uma maior ou menor passagem de fluido, provocando, respectivamente, uma maior ou menor coluna de água no poço da comporta. Quando a comporta está totalmente fechada a coluna de água, independentemente, da folga a montante é a correspondente à do nível da albufeira. Quando a comporta se encontra em posições intermédias existe escoamento a jusante da comporta, o que leva a uma diminuição da altura de coluna de água no poço. Esta diminuição é tanto maior quanto menor for a folga a montante, isto é, sabendo que a folga a jusante tem um valor fixo correspondente à área do vedante, se a folga a montante for idêntica à de jusante a coluna de água no poço tenderá a esvaziar, no caso de a folga a montante ser bastante superior a coluna de água tenderá a manter-se num nível perto do nível da albufeira. [10] [11]

Estas folgas influenciam o *downpull* através do coeficiente K_t (este coeficiente reflecte a carga aplicada na face superior), que representa a variação da geometria da face superior e do poço da comporta e influencia directamente o valor do *downpull*.

2.3.3. Espessura da comporta e chapa de face

A espessura da comporta é, também, um dado fundamental na magnitude do *downpull*, dado que depende da área de contacto superior e inferior. A espessura da comporta é representada por “d” e “d’”, representando a espessura após a aresta onde ocorre a separação do escoamento do bordo inferior (Figura 3.4), na situação mais comum em que a comporta apresenta o cutelo na face de jusante, “d’” corresponde à espessura da chapa de face.

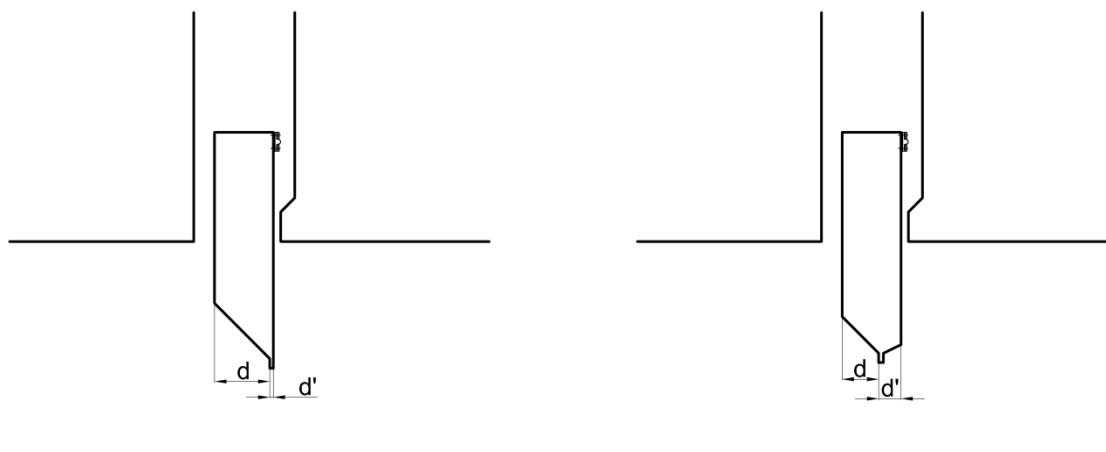


Figura 2.3 – Posição do cutelo

O *downpull* surge apenas nas comportas vagão com vedação a jusante e é fortemente influenciado pela geometria desta, pelo que se torna necessário conhecer as características deste tipo de comporta.

2.4. Comporta vagão

A comporta vagão é o tipo de comporta mais utilizado para regulação de caudal e fecho de emergência [5] [11]. É, essencialmente, constituída pelo tabuleiro, eixos, rodas e vedações. O tabuleiro é composto pela chapa de face e vigas de reforço, podendo a face inferior apresentar várias configurações (Figura 2.1). Apresenta-se na Figura 2.4 uma imagem global de uma comporta vagão.

As comportas mais comuns em instalações em túnel são com vedações e chapa de face a jusante. [6]



Figura 2.4 – Exemplo de comporta vagão

A comporta vagão pode apresentar várias configurações distintas, destacando-se a variação da posição da vedação (montante ou jusante) e a configuração da face inferior (com ou sem cutelo, posição do cutelo e ângulo de inclinação).

A comporta pode operar com um escoamento de superfície livre, ou escoamento submerso a jusante. No escoamento de superfície livre a conduta a jusante da comporta encontra-se à pressão atmosférica, considerando que o arejamento se encontra bem dimensionado. No escoamento submerso, a conduta a jusante encontra-se cheia de água e está sujeita a uma determinada pressão, levando a que a redução de pressão na face inferior da comporta seja inferior à ocorrida no escoamento de superfície livre e, conseqüentemente, a que o *downpull* seja inferior, pelo que o cálculo do *downpull* é efectuado para a pior situação, ou seja, escoamento de superfície livre.

Nas situações de escoamento de superfície livre um correcto dimensionamento do arejamento é muito importante para minimizar problemas de cavitação e vibrações na comporta. Estudos demonstram que um arejamento insuficiente cria pressões sub-atmosféricas na região a jusante da comporta levando a um aumento da carga sobre a comporta e conseqüente aumento do *downpull*. [12]

CAPÍTULO

3

Modelo analítico

Neste capítulo são apresentadas as fórmulas para o cálculo do downpull e dos seus parâmetros, assim como o procedimento para o processamento de gráficos que permitiram o desenvolvimento do modelo de cálculo analítico numa folha de cálculo.

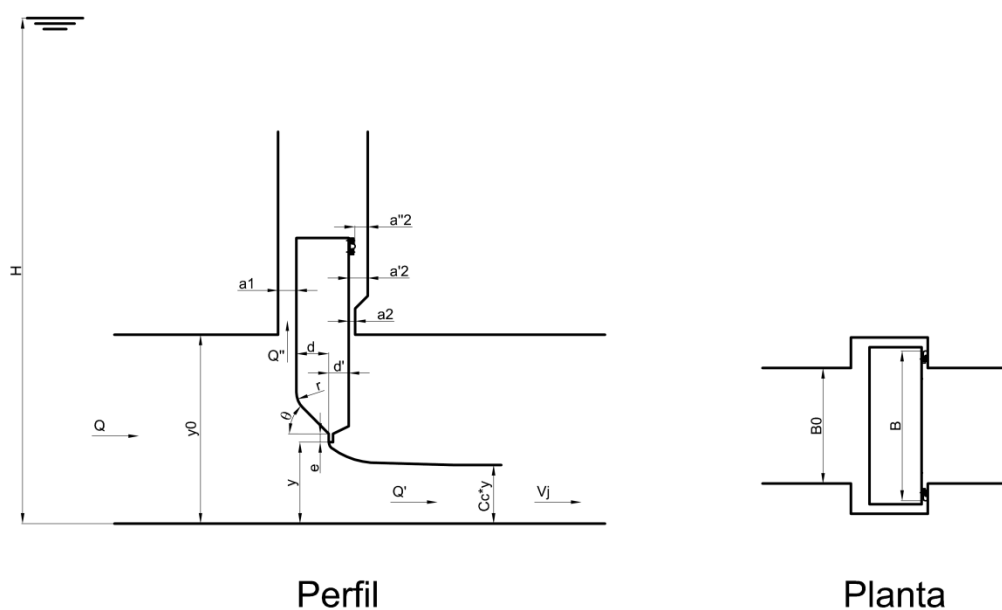


Figura 3.2 - Representação dos parâmetros geométricos envolvidos no cálculo do *downpull* – cutelo em posição intermédia

3.1.1. Balanço de forças

A força *downpull* (F_d) é decomposta em três componentes, que diferem entre si nas superfícies onde estão aplicadas e nos coeficientes utilizados (3.1.3), dependendo se a força é aplicada na face superior, inferior ou em ambas (Figura 3.3).

$$\vec{F}_d = \vec{F}_{d1} + \vec{F}_{d2} + \vec{F}_{d3} \quad (1)$$

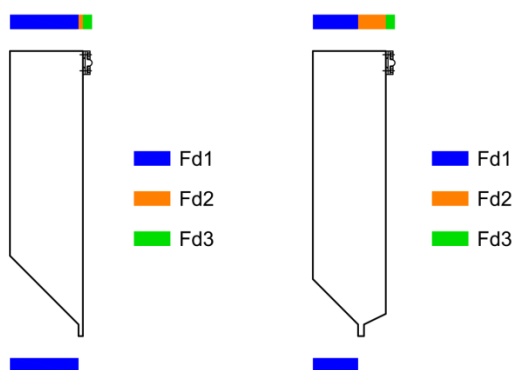


Figura 3.3 – Áreas de aplicação das componentes do *downpull*

A componente F_{d1} representa o balanço da força entre a face inferior e superior da comporta, para a espessura da comporta compreendida entre a face de montante e a aresta a montante da chapa de face ou do cutelo (dependendo do tipo de comporta), que corresponde à projecção das zonas azuis da Figura 3.3 e é dada pela fórmula 2.

$$F_{d1} = (\bar{K}_T - \bar{K}_B)Bd\rho \frac{v_j^2}{2} \quad (2)$$

A componente F_{d2} representa a força na face superior da comporta para a espessura da comporta compreendida entre a aresta a montante da chapa de face, ou do cutelo e a face jusante da chapa de face, que corresponde à projecção das zonas laranja da Figura 3.3 e é dada pela fórmula 3. Esta componente não é considerada na face inferior devido ao facto do escoamento descolar da superfície inferior na aresta a montante da chapa de face ou do cutelo. Esta situação pode ser visualizada esquematicamente na Figura 3.4.

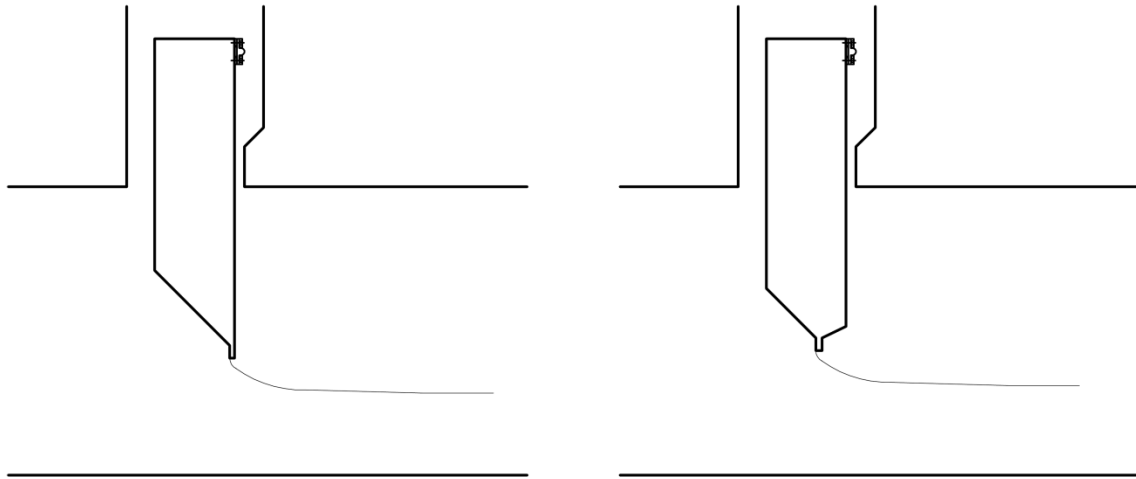


Figura 3.4 – Representação da separação do fluido da superfície inferior da comporta

$$F_{d2} \cong \bar{K}_T B d' \rho \frac{v_j^2}{2} \quad (3)$$

A componente F_{d3} representa a força exercida na área do vedante da travessa frontal da comporta, que corresponde à projecção das zonas a verde da Figura 3.3 e é dada pela fórmula 4. Esta força só é considerada na fase inicial da abertura, durante a qual o vedante está actuado, normalmente, corresponde a cerca de 10% da abertura máxima. Após esta abertura o vedante passa a estar sujeito a pressões equilibradas, pelo que a força deixa de ser considerada.

$$F_{d3} \cong \bar{K}_T B a_2 \rho \frac{V_j^2}{2} \quad (4)$$

3.1.2. Cálculo da velocidade

A velocidade na secção contraída imediatamente a jusante da comporta (V_j) é calculada de duas formas distintas, uma em função da carga (V_{j1}) e outra em função do caudal máximo e da secção de passagem (V_{j2}). Assim, a velocidade a ser usada no cálculo da força será V_{j1} até se atingir o caudal máximo e V_{j2} após se atingir o caudal máximo. A abertura correspondente ao caudal máximo é obtida igualando as expressões das duas velocidades e resolvendo a equação por tentativas para a abertura (y) [11]. De um modo mais simples, a velocidade V_{j2} apenas é utilizada quando passa a ter um valor inferior a V_{j1} .

$$V_{j1} = \sqrt{2g \left(H - H_e - C_c y - \frac{\Delta p}{\gamma} \right)} \quad (5)$$

$$V_{j2} = \frac{Q}{C_c * B * y} \quad (6)$$

$$H_e = C_e \frac{1}{2g} \left(\frac{Q}{A} \right)^2 \quad (7)$$

H_e - Perda de carga provocada pela forma de entrada da conduta.

C_e - Coeficiente de forma da entrada da conduta. Assumindo que se trata de uma entrada hidrodinâmica, o coeficiente toma o valor de 0,03.

Q - Caudal, normalmente é imposto pelo cliente. Nos casos em que não é especificado, é calculado em função da altura (H) e da área de passagem (A).

C_c - Coeficiente de contracção da comporta. Obtido graficamente e é função da percentagem de abertura e do número de Froude [5]. O gráfico foi digitalizado e processado para que se obtivesse a equação da curva nele contido, de forma a obterem-se valores mais correctos para cada percentagem de abertura.

$\frac{\Delta p}{\gamma}$ - Representa a depressão a jusante da comporta (relativa à pressão atmosférica). Considerando que existe uma conduta de arejamento e que a mesma está bem dimensionada, este parâmetro assume o valor zero, já que deve garantir a pressão atmosférica.

3.1.3. Coeficientes do *downpull*

3.1.3.1. Coeficiente K_b - face inferior

O coeficiente do *downpull* para a face inferior (K_b) depende, maioritariamente, da geometria da face inferior da comporta [5]. Os valores deste coeficiente são obtidos graficamente em função da geometria da comporta [5]. Os gráficos existentes não abrangem toda a gama de comportas, pelo que poderá ser necessário interpolar vários gráficos de modo a obter o coeficiente para um caso em concreto. De modo a evitar essas interpolações, recomenda-se a utilização das geometrias e parâmetros disponíveis nas figuras seguintes.

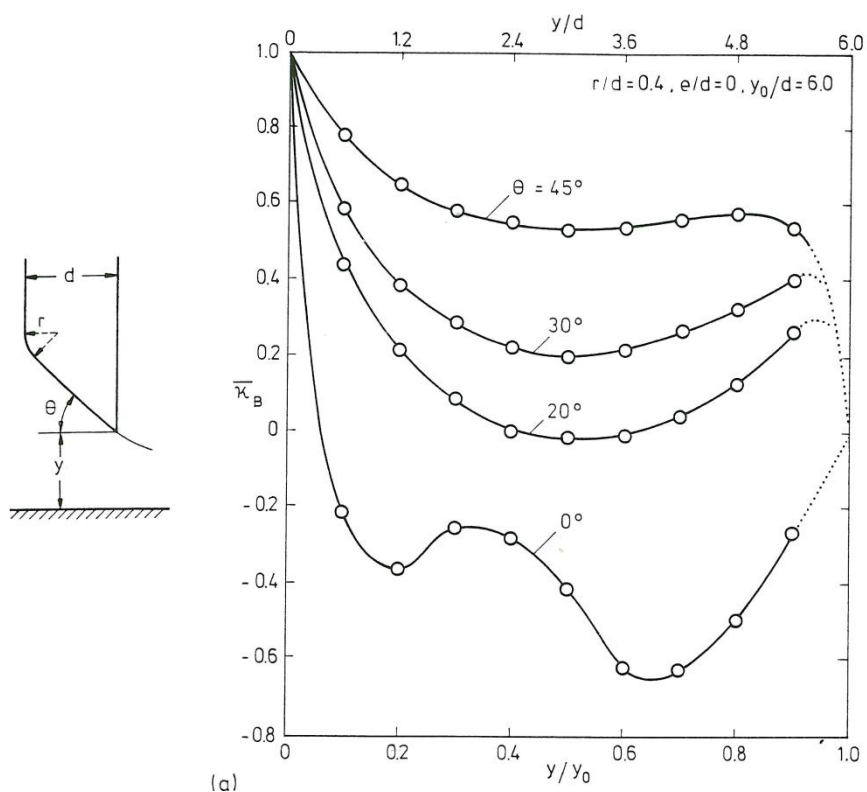


Figura 3.5 – Variação do K_b com a abertura da comporta de acordo com os parâmetros apresentados [5]

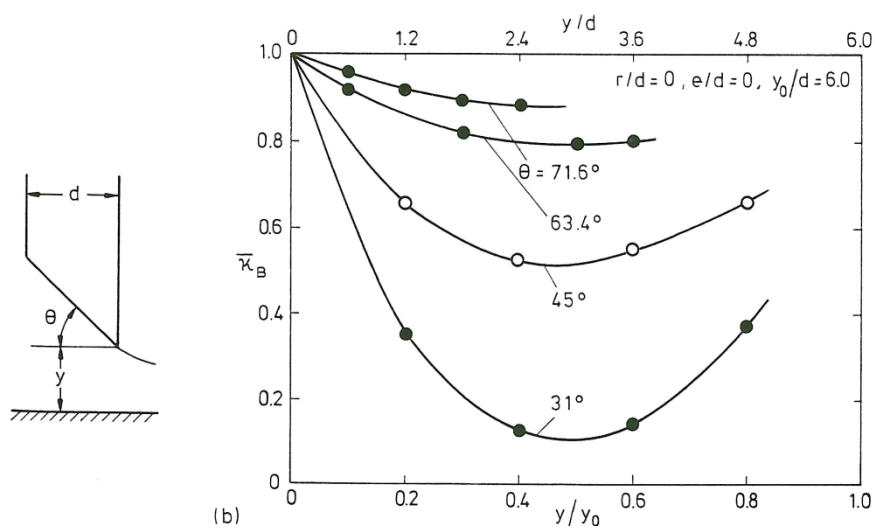
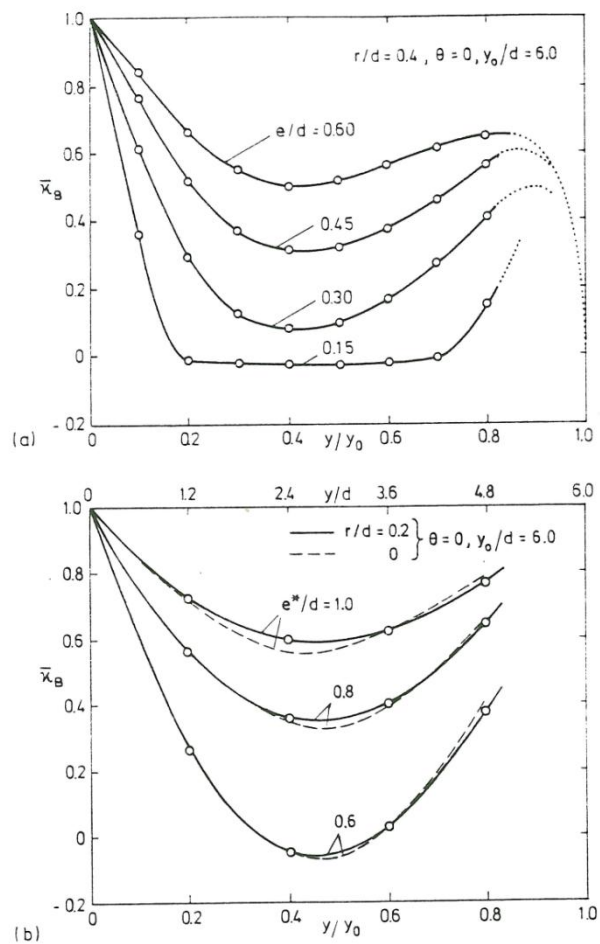
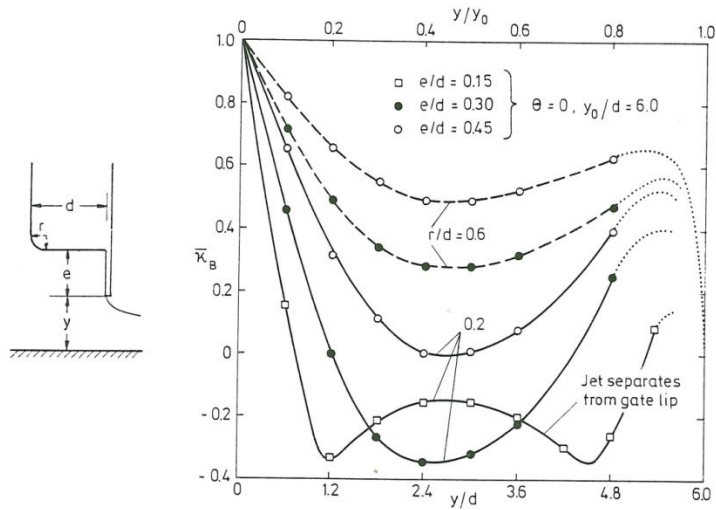


Figura 3.6 – Variação do K_b com a abertura da comporta de acordo com os parâmetros apresentados [5]



Um passo fundamental para a automatização, precisão e rapidez do cálculo foi o processamento destes gráficos em *Matlab* que permitiu a obtenção das equações de cada uma das curvas apresentadas nas figuras acima. Este processo foi bastante moroso e é apresentado abaixo.

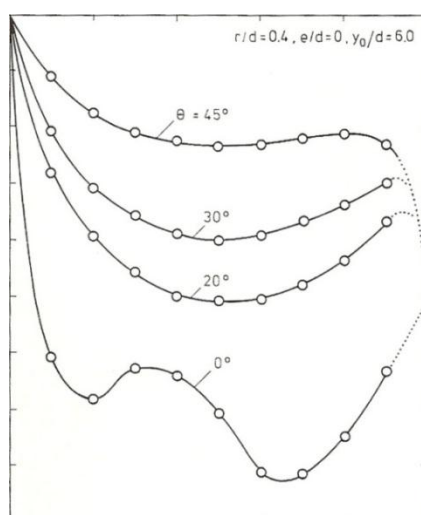


Figura 3.9 – Gráfico digitalizado

O primeiro passo foi a digitalização e tratamento da imagem de modo a garantir a esquadria, eliminando os desvios introduzidos pela digitalização.

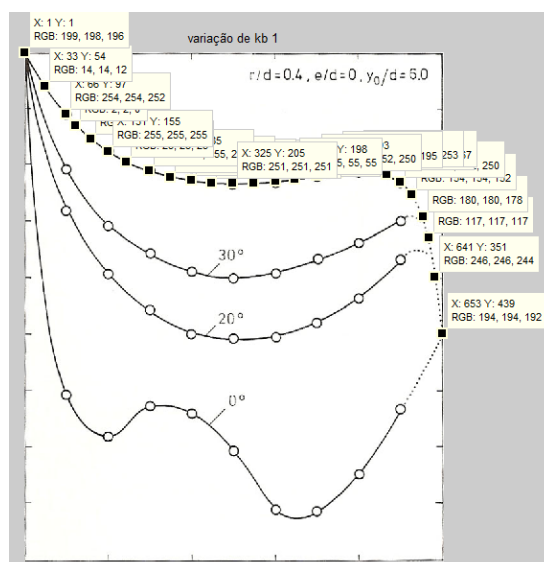


Figura 3.10 – Pontos para obtenção da curva e respectiva equação

Os pontos representados na Figura 3.10 permitiram obter as coordenadas de uma curva em particular, estas coordenadas foram, posteriormente, convertidas para a escala real do gráfico (Figura 3.5). As coordenadas convertidas permitem a construção do gráfico apresentado na Figura 3.11.

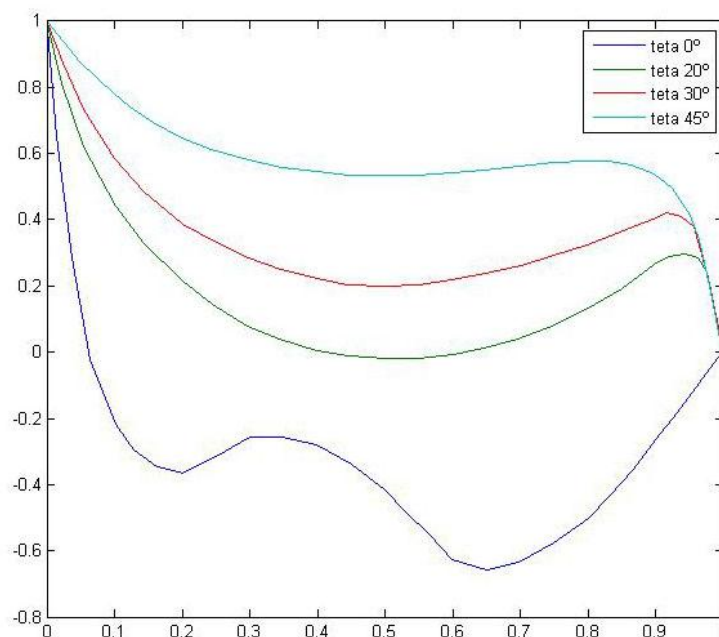


Figura 3.11 – Gráfico final

O passo seguinte foi a obtenção das equações das curvas, utilizando equações polinomiais, cujos graus variaram entre 5 e 10, optando sempre pela que melhor se ajustava à curva pretendida. Escolhida a equação retiravam-se os coeficientes de modo a que futuramente se possa obter facilmente qualquer valor de K_b .

Na prática, verifica-se que raramente uma comporta se enquadra exactamente nas geometrias apresentadas pelo que é necessário recorrer a interpolações.

Na Figura 3.12 demonstra-se a aplicação de uma interpolação entre duas curvas da Figura 3.5, sendo a curva do novo ângulo da face inferior resultado da interpolação linear entre os diversos pontos das curvas para 30° e 45°

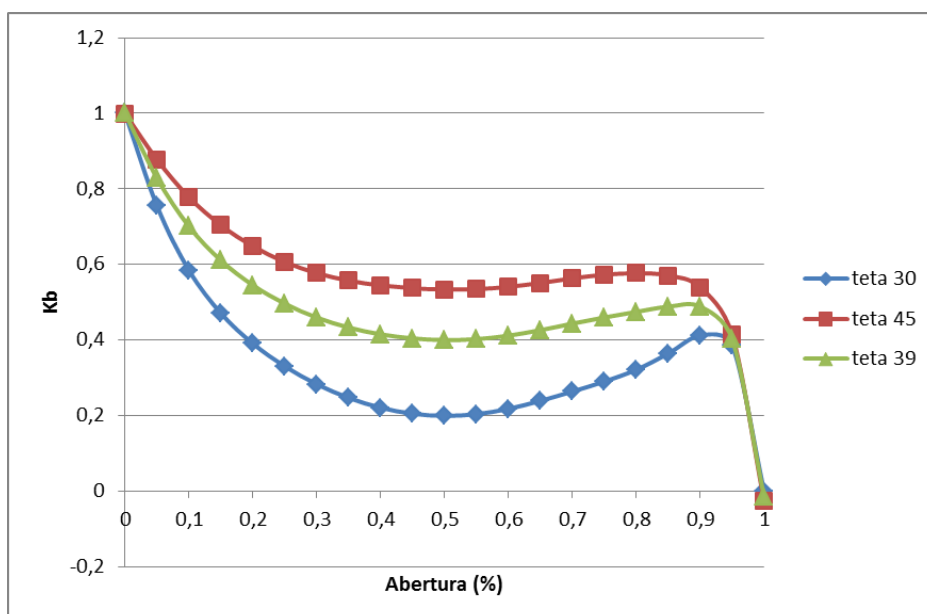


Figura 3.12 – Demonstração de interpolação

3.1.3.2. Coeficiente K_T - face superior

O coeficiente do *downpull* para a face superior (K_t) contrariamente ao anterior, não depende da geometria da comporta, mas sim da possível existência de vórtices na parte superior da conduta, imediatamente a montante da comporta (K'_t) e do escoamento por cima da comporta (K''_t).

$$\bar{K}_T = K'_T K''_T \quad (8)$$

$$K'_T = 1 - \varepsilon_{ce} \left(\frac{V_0}{V_j} \right)^2 = 1 - \varepsilon_{ce} \frac{C_{c2}^2 y^2}{y_0^2} \left(1 - \frac{Q''}{Q'} \right)^2 \quad (9)$$

Apesar de serem conhecidas as variáveis necessárias para o cálculo deste coeficiente, este é considerado igual a um (1), assumindo que não existem vórtices na parte superior da conduta. Esta consideração leva a um cálculo de K_t conservativo, o que, dada a importância do *downpull* na segurança das instalações considera-se aceitável o valor assumido.

$$K''_T = \frac{1}{1 + \left(\frac{C_{c2} A_2}{C_{c1} A_1} \right)^2} \quad (10)$$

C_1 e C_2 são coeficientes de contração nas zonas A_1 e A_2 respectivamente.

O coeficiente C_2 depende somente da geometria da zona envolvente à comporta.

$$C_2 = \sqrt{\frac{1}{\alpha'_2 + \left[1 - \frac{a''_2}{a'_2} - \frac{1 - a''_2/a'_2}{C''_c * a''_2/a'_2}\right]^2}} \quad (11)$$

α'_2 - é adoptado o valor 1, considerado adequado para o tipo de recesso utilizado [5].

C''_c - é assumido o valor médio de 0,6 [5].

A falta de dados leva a que se considere o coeficiente C_1 igual a C_2 [11], ficando o coeficiente K_t apenas dependente da relação entre as áreas de passagem a montante e a jusante da comporta. A folga a jusante é, no entanto, limitada pelo tipo de vedação da comporta, pelo que o coeficiente K_t fica apenas dependente da folga a montante.

3.1.4. Tipo de escoamento adoptado no modelo

O procedimento acima demonstrado para o cálculo analítico do *downpull* tem por base o escoamento de superfície livre, pelo facto de este tipo de escoamento representar a situação mais desfavorável. Se a conduta estiver em escoamento submerso, a jusante da comporta gera-se uma carga piezométrica que provoca uma diminuição da velocidade do escoamento e, consequentemente, uma diminuição do efeito de *downpull*.

CAPÍTULO

4

Modelo numérico em CFD com volumes finitos

Neste capítulo é descrita a evolução da elaboração do modelo de simulação numérica em CFD e as características do modelo final que serviu de base à realização dos ensaios.

4. Modelo numérico em CFD com volumes finitos

Tal como já foi referido anteriormente, a utilização do modelo de simulação numérica em CFD com volumes finitos, tem como objectivo a validação do modelo analítico.

A utilização de modelos de volumes finitos apresenta como principal vantagem o facto de se conseguir reproduzir, detalhadamente, o caso em estudo, evitando assim as aproximações assumidas no modelo analítico.

4.1. Desenvolvimento do modelo

A definição da geometria final a utilizar no cálculo por volumes finitos, foi sofrendo alterações ao longo do desenvolvimento do trabalho, sempre com o objectivo de otimizar os resultados e o processo.

A geometria inicial era composta pela conduta de entrada, pelo poço da comporta e pela conduta de saída, baseado nos modelos apresentados em artigos de referência [2] [4] [13], a sua modelação encontra-se no anexo 2.

As principais modificações ao modelo são, sumariamente, descritas de seguida, sendo que as geometrias testadas e respectivas descrições são apresentadas no anexo 2. A geometria inicial foi baseada em exemplos existentes [2] [4] [13], que apresentam comprimentos de entrada e saída curtos, no entanto, e ao realizar os primeiros ensaios, verificou-se que um comprimento demasiado curto impossibilitava a estabilização do escoamento entre a entrada e a comporta, pelo que se aumentou o comprimento da conduta de entrada. O mesmo foi efectuado para o poço da comporta e para a conduta de saída. Foi introduzida a conduta de arejamento a fim de eliminar as depressões ocorridas imediatamente a jusante da comporta, simulando, assim, o escoamento em superfície livre (tipo de escoamento utilizado no cálculo analítico). Numa fase intermédia, foi adicionado um reservatório, de modo a reproduzir de forma natural as condições de entrada na conduta, evitando, assim, a imposição de condições de entrada. No entanto, comparando os resultados relativamente a uma geometria com um perfil gradual

da pressão de entrada, a diferença é de cerca de 5% e não justifica o tempo adicional de análise de cada ensaio devido ao aumento da complexidade e do volume do modelo.

4.2. Modelo final

O modelo geométrico final é composto pela conduta de entrada, pela conduta de saída, pelo poço da comporta e pela conduta de arejamento, com um comprimento de 10 vezes a altura da conduta. Esta redução relativamente a um modelo intermédio com comprimentos de cerca de 25 vezes maiores deveu-se a uma optimização de recursos e tempo, sem que, no entanto, tenham sido afectados os resultados. O modelo pode ser observado na Figura 4.1.

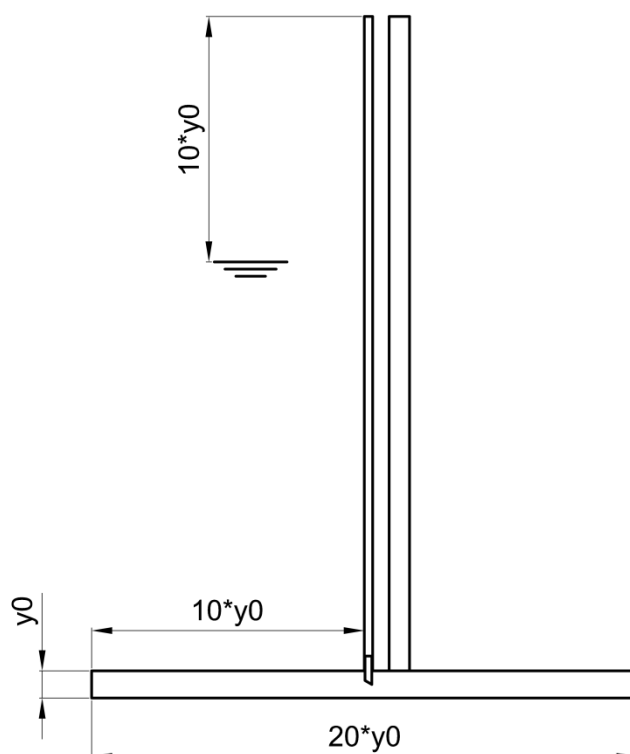


Figura 4.1 – Geometria tipo

A simulação numérica em CFD inicia-se com a importação do modelo geométrico semelhante ao apresentado na Figura 4.1, construído em *solidworks* com

elementos de superfície (espessura zero), e convertido para o formato *parasolid*. A importação de todos os elementos desenhados é feita para, apenas, um corpo e uma região. Após a importação, definem-se as faces em que, posteriormente serão aplicadas as condições de fronteira da entrada, da saída do escoamento, do poço da comporta, da conduta de arejamento e as faces que compõem a comporta para obtenção do *downpull* a que esta está sujeita.

Para a malha de superfície utilizou-se um modelo que permite obter uma melhor qualidade da malha nas superfícies e optimizá-las para a malha de volume, utilizando a re-triangulação das superfícies existentes. A escolha do tamanho da malha é função da precisão requerida, sendo, no entanto, condicionada pelo *hardware* e tempo disponíveis para a execução da simulação. Foi criado um volume de controlo na zona envolvente à comporta, para o qual se efectuou um refinamento da malha, com o objectivo de melhorar os resultados obtidos.

Como condições físicas considerou-se um escoamento estacionário, com mistura de fluidos (ar e água) e VOF (Volume Of Fluid), para garantir uma maior diferenciação dos fluidos nas zonas de contacto. O escoamento é turbulento (confirmado em cada caso pelo cálculo analítico do número de Reynolds), tendo-se considerado o modelo de turbulência k-épsilon. Foi, também, considerado o efeito da gravidade.

Como condições de fronteira considera-se a entrada da conduta como uma entrada de pressão, definida por uma função variável com a pressão hidrostática e, apenas, com entrada de água. O poço da comporta e a conduta de arejamento são, igualmente, considerados como entradas de pressão à pressão atmosférica e, apenas, com entrada de ar. A saída da conduta é considerada uma saída de pressão à pressão atmosférica e com saída de água e ar.

De modo a optimizar o arranque da simulação consideraram-se, como condições iniciais, os volumes ocupados por cada fluido e a pressão hidrostática correspondente à carga hidrostática do empreendimento em estudo. Estas condições podem ser vistas na Figura 4.2 e na Figura 4.3.

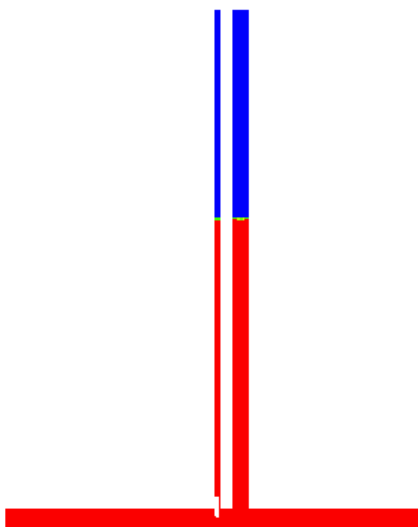


Figura 4.2 – Representação dos volumes iniciais de água (vermelho) e ar (azul)

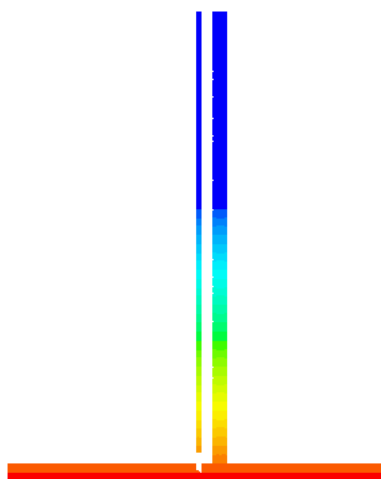


Figura 4.3 – Representação da pressão inicial

O *downpull* é obtido pela força vertical originada pelas diferenças de pressões nas faces superior e inferior da comporta.

CAPÍTULO

5

Validação dos modelos utilizados

Neste capítulo é efectuada a comparação entre os resultados obtidos por um modelo experimental e um modelo CFD bidimensional com o modelo analítico e o modelo CFD tridimensional expostos no capítulo 3 e capítulo 4, respectivamente, com o objectivo de comparar e validar os modelos desenvolvidos no âmbito deste trabalho.

5. Validação dos modelos utilizados

No sentido de se validar os dois modelos apresentados nos capítulos 3 e 4, é realizada uma comparação com um artigo de referência e cientificamente aceite, intitulado "*A High Head Gate Innovation - Numerical and Experimental Analysis of Hydrodynamic Forces*" [2], no qual é apresentada a comparação entre dois tipos de comportas. A comparação é efectuada entre um ensaio experimental em modelo reduzido à escala de 1:25 e um ensaio com recurso a *software* de elementos finitos para ambas as comportas. Uma das comportas representa as comportas vagão normalmente utilizadas como comportas de segurança e a outra apresenta um *design* inovador, com uma significativa redução do *downpull*.

5.1. Geometria da comporta

Para o estudo comparativo dos diferentes modelos de cálculo utiliza-se a comporta tipo A do artigo referido no parágrafo acima. Apresenta uma geometria bastante similar à apresentada no capítulo 3, sendo que a presente comporta não apresenta cutelo na face inferior. Na Figura 5.1 e Figura 5.2 são apresentadas as dimensões da conduta e da ranhura e da comporta, respectivamente. A face inferior faz um ângulo de 30° com a horizontal, esta cota apenas é descrita textualmente no artigo.

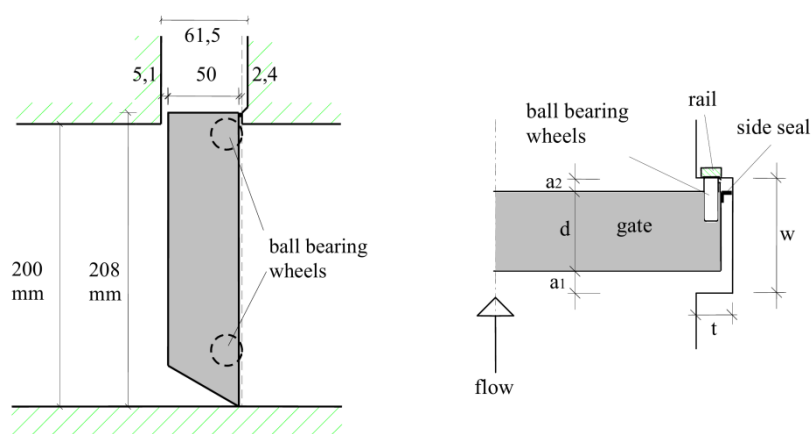


Figura 5.1 – Dimensões da conduta e ranhura da comporta [2]

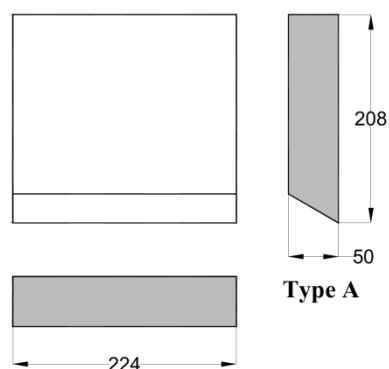


Figura 5.2 – Dimensões da comporta [2]

5.2. Análise dos ensaios apresentados no artigo

5.2.1. Modelo experimental

A estrutura para a realização do ensaio é composta, essencialmente, por: reservatório, conduta, poço da comporta e tubo de arejamento. O reservatório assegura um nível constante de água para todas as aberturas da comporta e exceptuando o reservatório, todos os restantes elementos são em acrílico para uma fácil visualização do escoamento no seu interior. A estrutura de ensaios é apresentada na Figura 5.3, destacando-se o pormenor da zona da comporta na Figura 5.4

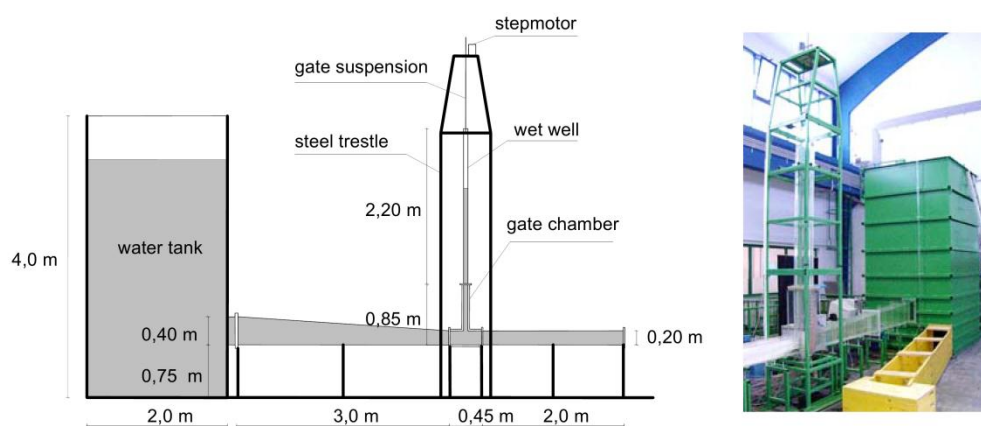


Figura 5.3 – Estrutura de ensaios [2]

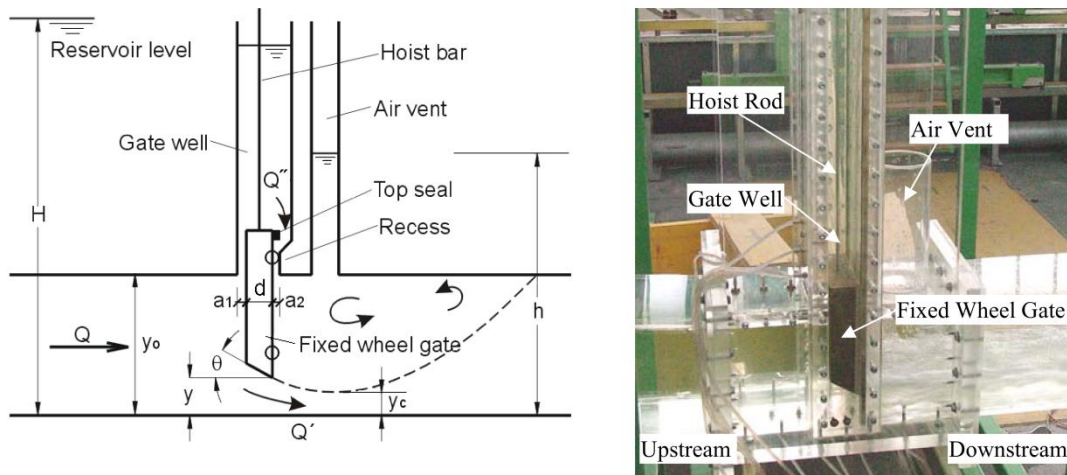


Figura 5.4 – Estrutura na zona da comporta [2]

Os resultados apresentados no artigo envolvem os dois tipos de comportas, referidos anteriormente, e quatro alturas manométricas diferentes. Para a validação dos modelos em estudo apenas é relevante a comporta do tipo A e optou-se pela altura de 3 m.c.a..

Os resultados obtidos nos ensaios são apresentados na Figura 5.5, sendo a curva correspondente ao ensaio pretendido a curva superior.

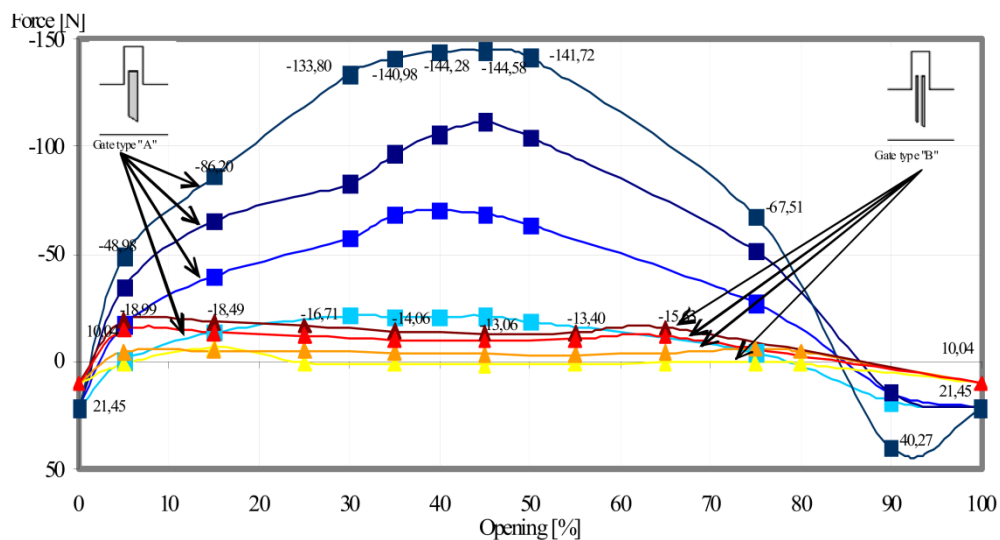


Figura 5.5 – Resultados do modelo reduzido [2]

5.2.2. Modelo em CFD com elementos finitos

A comporta em estudo foi analisada com *software* de CFD com elementos finitos, num modelo bidimensional que contém, apenas, uma entrada e uma saída. A zona do poço da comporta é fechada no topo e tem uma altura de três vezes a altura da conduta. O comprimento do modelo é de dez vezes a altura da conduta. Os ensaios foram realizados para quatro diferentes níveis de água no reservatório e para cinco aberturas diferentes (5%, 25%, 35%, 45%, e 65%), sendo, apenas, utilizado no caso em estudo o nível de 3 m.c.a..

Os resultados obtidos são apresentados na Figura 5.6

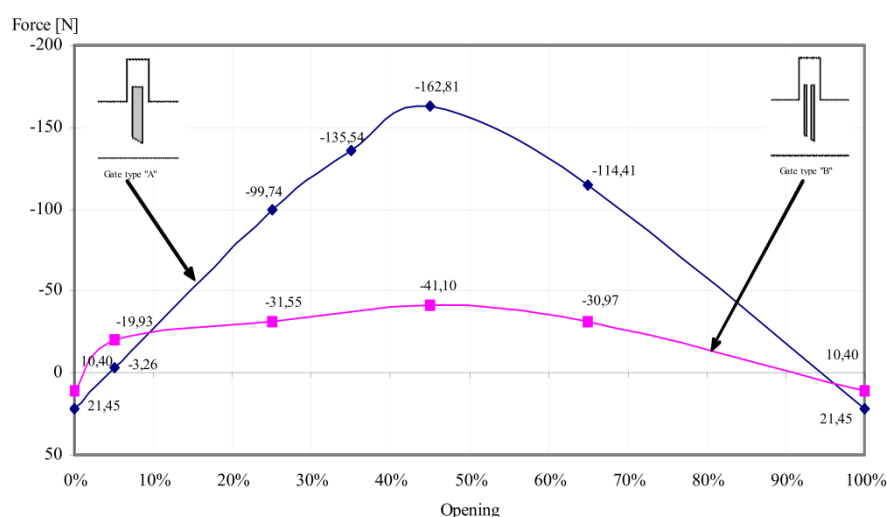


Figura 5.6 – Resultados da análise com elementos finitos [2]

5.3. Modelo analítico

Para a realização do cálculo pelo modelo analítico apresentado no capítulo 3 são necessários alguns dados que são apresentados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Dados para o cálculo do downpull

Dados fornecidos		
Símbolo	Descrição	Valor
H	Altura da coluna de água	3 m
Q	Caudal máximo	0,30688 m ³ /s
y0	Altura da conduta	0,2 m
B0	Largura da conduta	0,2 m
A	Área da conduta	0,04 m ²
B	Largura da comporta em carga	0,212 m
a1	Folga a montante	0,0051 m
a2	Largura da vedação a jusante	0,0024 m
a'2	Recesso a jusante	0,004 m
a''2	Zona contraída a jusante	0,0016 m
As	Área da vedação superior	0,00051 m ²
e	Altura do bordo inferior	0 m
d	Espessura da comporta	0,05 m
d'	Espessura da chapa de face	0 m
r	Raio do bordo de ataque	0 m
θ	Angulo de entrada	30 °
ρ	Peso específico da água	998 kg/m ³
g	Aceleração da gravidade	9,81 m/s ²

Dados assumidos		
Δp/γ		0 Pa
Ce		0,03
α'2		1
C''c		0,6

A aplicação das fórmulas apresentadas no capítulo 3 com os valores apresentados na Tabela 5.1 e retirados do gráfico apresentado na Figura 3.6, resulta nos valores do *downpull* apresentados na Tabela 5.2, para aberturas de 5% em 5%.

Tabela 5.2– Força downpull artigo

y/y0	y (m)	Cc	Vj (m/s)	kt	kb	Fd1 (N)	Fd2 (N)	Fd3 (N)	Fd (N)
0,00	0,001	0,61	7,56	0,82	1,00	54,02	0,00	-14,94	39,07
0,05	0,01	0,61	7,55	0,82	0,81	-1,28	0,00	-11,84	-16,23
0,10	0,02	0,61	7,54	0,82	0,63	-55,32	0,00	-11,82	-70,27
0,15	0,03	0,61	7,53	0,82	0,48	-101,15	0,00	0,00	-101,15
0,20	0,04	0,62	7,52	0,82	0,36	-136,92	0,00	0,00	-136,92
0,25	0,05	0,62	7,52	0,82	0,27	-163,44	0,00	0,00	-163,44
0,30	0,06	0,62	7,51	0,82	0,21	-182,50	0,00	0,00	-182,50
0,35	0,07	0,63	7,50	0,82	0,16	-195,88	0,00	0,00	-195,88
0,40	0,08	0,63	7,49	0,82	0,13	-204,77	0,00	0,00	-204,77

0,45	0,09	0,64	7,48	0,82	0,11	-209,67	0,00	0,00	-209,67
0,50	0,10	0,65	7,47	0,82	0,11	-210,53	0,00	0,00	-210,53
0,55	0,11	0,66	7,46	0,82	0,12	-207,06	0,00	0,00	-207,06
0,60	0,12	0,66	7,45	0,82	0,14	-199,06	0,00	0,00	-199,06
0,65	0,13	0,68	7,44	0,82	0,18	-186,67	0,00	0,00	-186,67
0,70	0,14	0,69	7,43	0,82	0,23	-170,49	0,00	0,00	-170,49
0,75	0,15	0,70	7,42	0,82	0,30	-151,38	0,00	0,00	-151,38
0,80	0,16	0,72	7,40	0,82	0,37	-129,81	0,00	0,00	-129,81
0,85	0,17	0,75	7,39	0,82	0,46	0,00	0,00	0,00	0,00
0,90	0,18	0,79	7,37	0,82	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,95	0,19	0,84	7,35	0,82	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,00	0,20	0,90	7,32	0,82	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

5.4. Modelo em CFD com volumes finitos

A geometria utilizada apresenta as características descritas no capítulo 4. Apenas é apresentada a geometria e figuras com resultados correspondentes à abertura com *downpull* máximo (50%), sendo os resultados das restantes aberturas apresentadas sobre a forma de tabela. As figuras relativas a outras aberturas são apresentadas no anexo 3.

Na figura 6.3 apresenta-se a geometria em estudo para a abertura de 50%, para as restantes aberturas a única variação é a posição vertical da comporta.

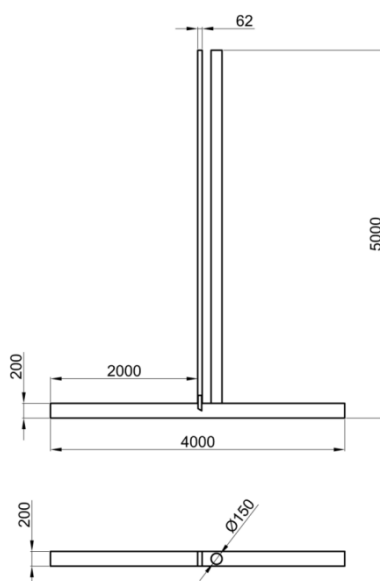


Figura 5.7 – Geometria para análise com CFD – dimensões gerais

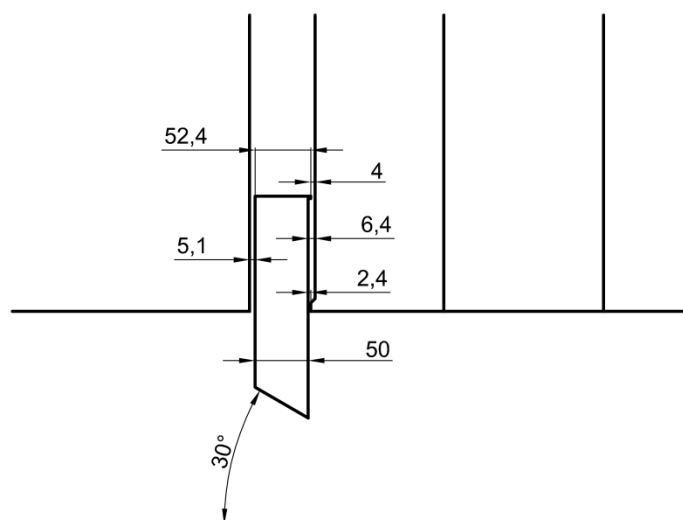


Figura 5.8 – Geometria para análise com CFD – dimensões da comporta

Considerou-se como tamanho base para a malha 25 mm, sendo aplicado um volume de controlo na zona envolvente à comporta, com o objectivo de refinar a malha nessa zona, tendo-se utilizado para isso uma malha de 2,5 mm, o que resultou numa malha de volume com cerca de meio milhão de células. Na Figura 5.9 pode-se ver a malha refinada na zona envolvente à comporta e a malha base nos extremos.

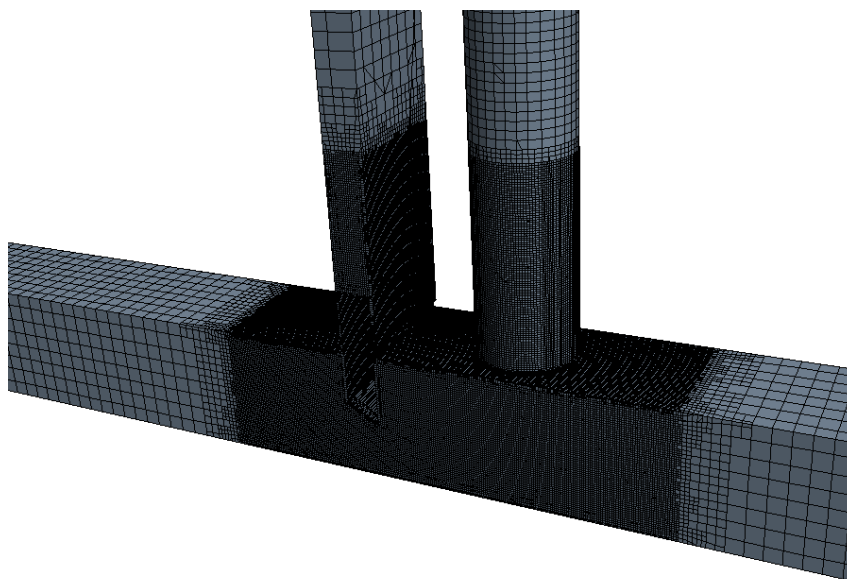


Figura 5.9 – Malha de volume

A opção tomada relativamente ao tamanho da malha teve em consideração o rigor pretendido e o tempo despendido. Por um lado, pretende-se que os resultados sejam o mais rigorosos possível, mas, também, se pretende que a obtenção de resultados e conclusões seja o mais breve possível. Quanto mais reduzido for o tamanho da malha, maiores são os requisitos de *hardware* e tempo necessário para a obtenção de resultados. Ao longo do desenvolvimento deste trabalho foram efectuados muitos ensaios, variando, consecutivamente, as geometrias, modelos e tamanho da malha e modelos físicos, concluindo, relativamente à malha, que a redução do seu tamanho tem uma influência pouco significativa nos resultados mas aumenta exponencialmente os recursos e tempo necessários à sua execução.

O tamanho de malha referido resulta numa malha de volume com cerca de meio milhão de células e foram necessários cerca de dois dias para se obterem resultados já estabilizados para cada ensaio. Neste caso em particular foram ensaiadas doze aberturas, o que corresponde a doze ensaios. O *hardware* disponível permitiu realizar no máximo três ensaios em simultâneo, o que resultou num tempo total despendido de aproximadamente quatro dias.

Da Figura 5.10 à Figura 5.13 podem observar-se alguns dos resultados obtidos.

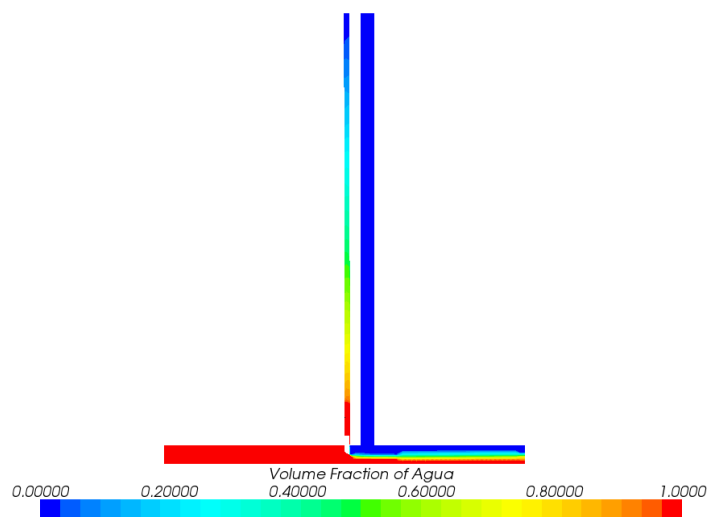


Figura 5.10 – Volume de água e ar

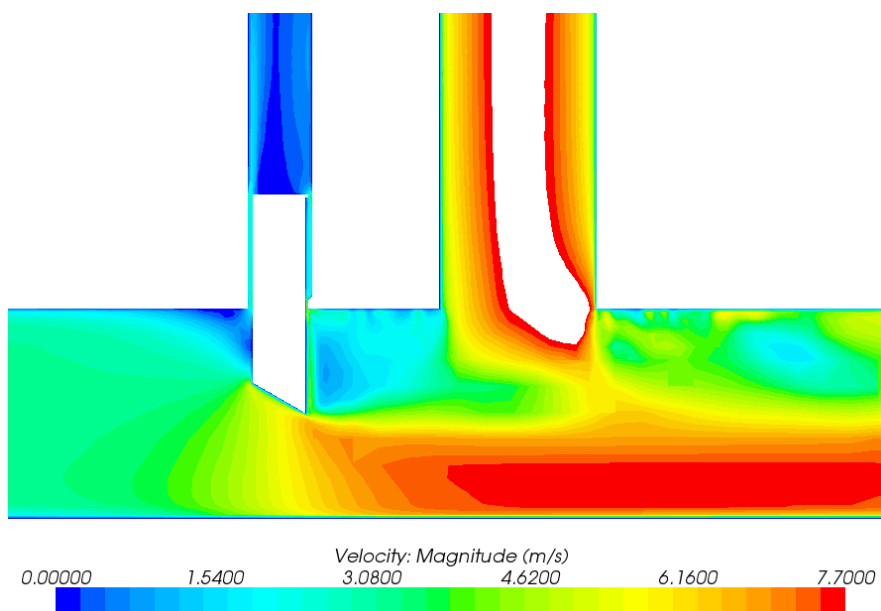
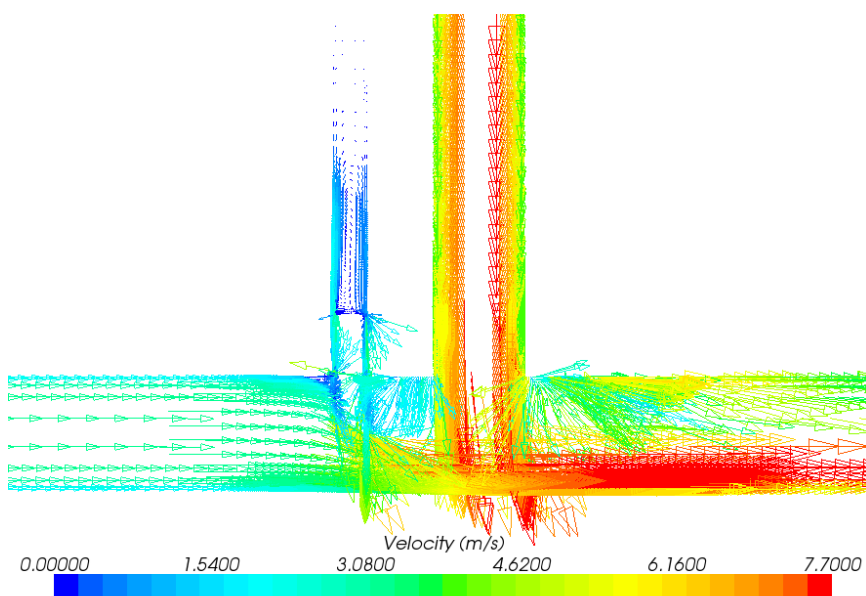
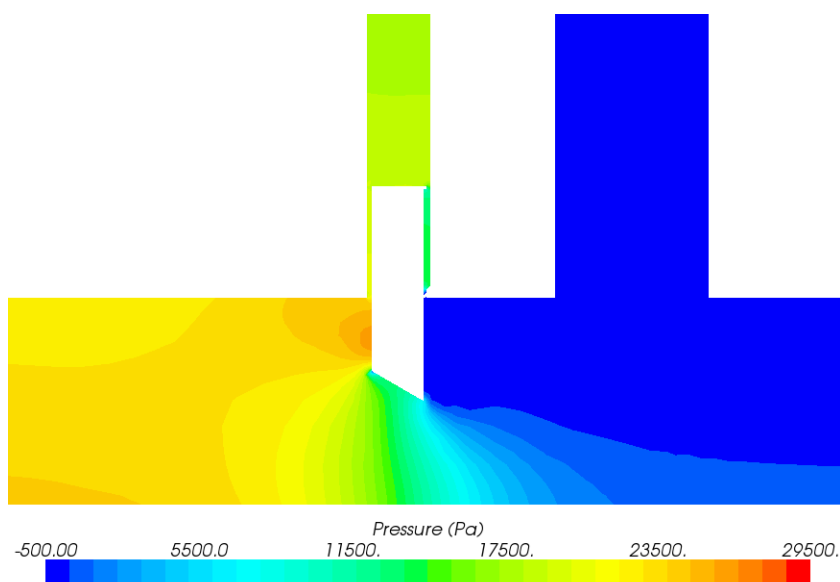


Figura 5.11 – Velocidade – perfil longitudinal (escalar)

**Figura 5.12 – Velocidade (vector)**

Na Figura 5.11 e Figura 5.12 não está representada a velocidade no meio da conduta de arejamento, devido à limitação imposta do valor máximo na escala, de modo a realçar a velocidade da água na zona contraída a jusante da comporta.

**Figura 5.13 – Pressão**

5.5. Apresentação e análise de resultados

Os resultados obtidos pelo modelo analítico e pelo modelo de volumes finitos foram inseridos juntamente com os resultados apresentados no artigo na Tabela 5.3. Para uma visualização mais fácil são, também, apresentados na Figura 5.14.

Tabela 5.3 – Comparação de resultados

Abertura (%)	Fd - Experim. (N)	Fd - CFD 2D (N)	Fd - Analítico (N)	Fd - CFD 3D (N)
0	21,45	21,45	39,07	
5	-48,98	-3,25	-16,23	21,00
10			-70,27	
15	-86,20		-101,15	-42,00
20			-136,92	
25		-99,74	-163,44	-71,00
30	-133,80		-182,50	
35	-140,98	-133,54	-195,88	-85,60
40	-144,28		-204,77	
45	-144,58	-162,81	-209,67	-87,60
50	-141,72		-210,53	-90,00
55			-207,06	-80,00
60			-199,06	
65		-114,41	-186,67	-58,50
70			-170,49	
75	-67,51		-151,38	-29,50
80			-129,81	
85				18,00
90	40,27			-45,70
95				-42,20
100	21,45	21,45		

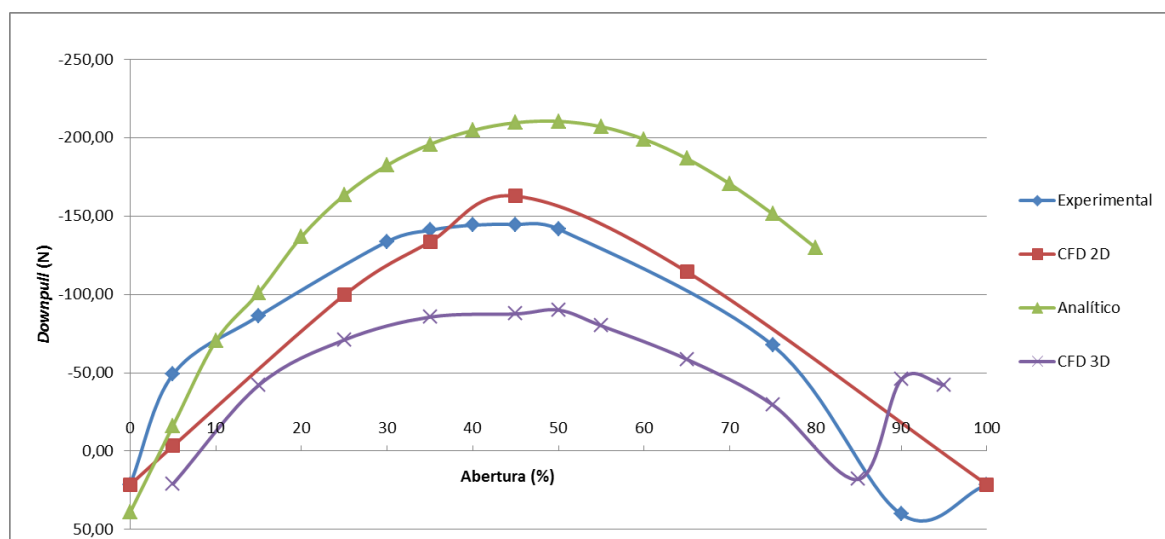


Figura 5.14 – Comparação de resultados

Numa primeira análise à Figura 5.14, verifica-se que existe uma grande discrepância de valores do *downpull* entre os diferentes modelos.

Considerando como referência os valores do ensaio experimental, apresentam-se abaixo as diferenças percentuais para cada um dos outros três modelos de cálculo utilizados.

O modelo CFD bidimensional com elementos finitos apresentado no ponto 5.2.2 apresenta uma diferença de 13% na zona de *downpull* máximo, esta diferença é considerada aceitável devido à complexidade da estrutura e do escoamento.

O modelo analítico apresenta uma diferença de 49% (superior) na zona de *downpull* máximo, esta diferença é bastante significativa e pode ser explicada por algumas suposições e valores assumidos no cálculo que o tornaram mais conservativo, nomeadamente K''_t , α'_2 , C''_c e C_1 .

O modelo CFD tridimensional com volumes finitos apresenta uma diferença de 39% (inferior) relativamente ao ensaio experimental e de 57% (inferior) relativamente ao modelo analítico na zona de *downpull* máximo, estas diferenças são bastante significativas, mas, no entanto, a curva do *downpull* é semelhante em termos de forma.

No sentido de validar estes valores, efectuou-se confirmação da velocidade do escoamento na zona contraída, sendo esta um dos parâmetros mais importantes do cálculo do *downpull*. Comparando a Tabela 5.2 e a Figura 5.11 verifica-se que as velocidades obtidas pelos dois modelos são muito idênticas, pelo que a

diferença entre os valores do *downpull* terá de ser, cuidadosamente, analisada antes de se utilizarem estes valores.

5.6. Análise de sensibilidade

O modelo em CFD com volumes finitos apresenta diferenças bastante significativas relativamente aos outros modelos, verificando-se contudo, similaridade na forma da curva de resultados. No sentido de confirmar esta similaridade entre os modelos efectuou-se a variação independente de dois importantes parâmetros geométricos, utilizando a abertura da comporta com *downpull* máximo (50%).

A primeira variação foi a folga a montante da comporta. Assumindo como valor de referência a folga a montante igual à folga a jusante, efectuou-se uma variação em percentagem desde 50% até 5000% que corresponde a uma folga entre 1,2 mm e 120 mm. Apresentam-se na Figura 5.15 os resultados obtidos.

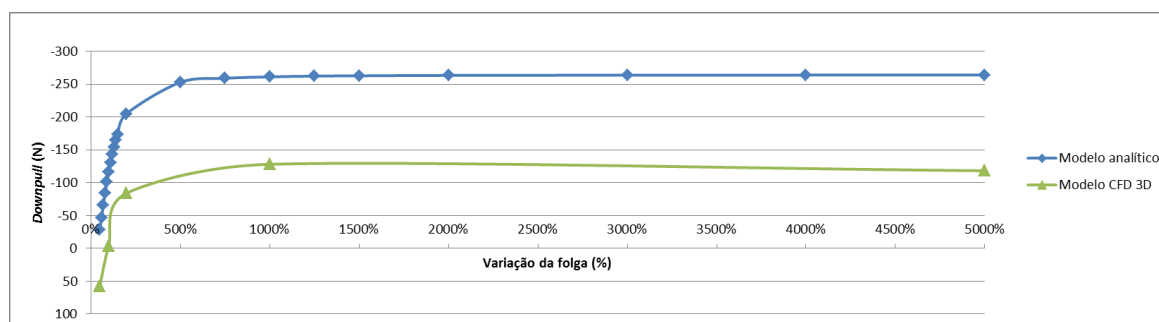


Figura 5.15 – Análise de sensibilidade para variação da folga de montante

A Figura 5.15 permite verificar a correspondência de forma da curva do *downpull*, e, simultaneamente, que a folga de montante exerce uma influência muito significativa no valor do *downpull* até cerca de 500%, estabilizando após este valor.

A segunda variação foi a alteração do ângulo da face inferior, neste caso variou-se o ângulo de 30° para 45° e 63,4°, valores de referência do gráfico da Figura 3.6. Apresentam-se na Figura 5.16 os resultados obtidos.

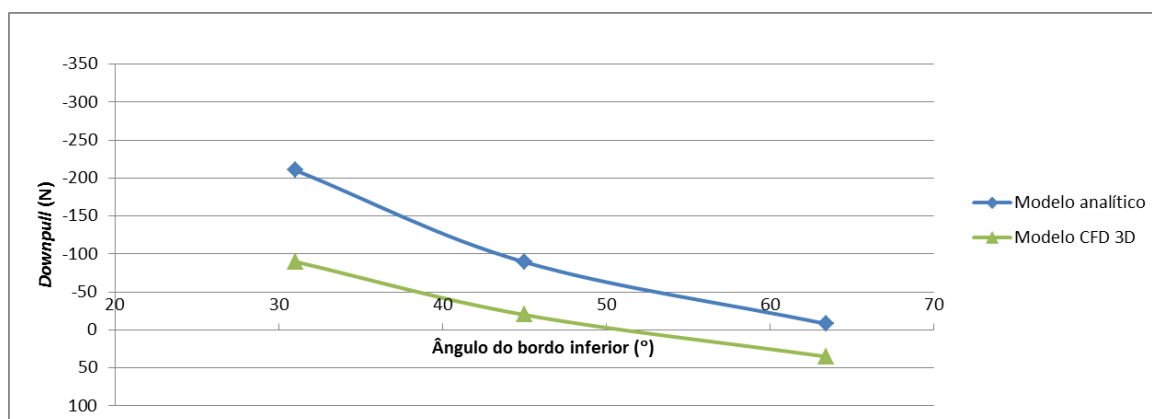


Figura 5.16 – Análise de sensibilidade para variação do ângulo da face inferior

Verifica-se, também, neste segundo caso uma similaridade entre as curvas dos 2 modelos.

5.6.1. Resumo da análise de sensibilidade

Esta análise permitiu confirmar a sensibilidade do modelo em CFD com volumes finitos a variações de parâmetros geométricos no modelo analítico.

5.7. Conclusões

Os resultados obtidos pelo modelo analítico são satisfatórios, dado que, o modelo de cálculo desenvolvido garante uma margem de segurança bastante confortável, sendo 49% superior relativamente ao ensaio experimental.

Os resultados obtidos pelo modelo em CFD com volumes finitos foram um pouco surpreendentes, sendo inferiores em cerca de 39% relativamente ao ensaio experimental e de 57% relativamente ao modelo analítico, na zona de *downpull* máximo. Era expectável que estes resultados fossem inferiores ao modelo analítico devido a algumas opções conservativas assumidas nos cálculos, mas era, no entanto, esperado que fossem idênticos aos valores do ensaio experimental.

Comparando os dois modelos em termos de complexidade de execução e tempo despendido para a obtenção de resultados, verifica-se uma enorme diferença entre eles.

O modelo analítico está inserido numa folha de cálculo, sendo apenas necessário a substituição dos parâmetros em células já destacadas para se obterem os valores do *downpull*, pelo que são necessários apenas alguns minutos para a obtenção de valores.

O modelo em CFD com volumes finitos implica a construção de um modelo 3D em CAD (Computer Aided Design) e um modelo em CFD, para cada abertura em que se pretenda conhecer o *downpull*. O tempo despendido na elaboração dos modelos depende do número de aberturas a analisar, demorando, neste caso, cerca de dois dias, a este, acresce o tempo necessário para a análise dos modelos que é aproximadamente quadro dias (ponto 5.4), resultando num total de seis dias para se conseguirem obter resultados.

Em suma, o modelo analítico permite a obtenção de resultados em cerca de 10 minutos ao invés do modelo em CFD em que são necessários aproximadamente seis dias.

Com este capítulo pode-se concluir que o modelo analítico desenvolvido no capítulo 2 apresenta resultados conservativos e com bastante rapidez ao invés do modelo em CFD, em que os resultados indiciam que o *downpull* está a ser sobrestimado em mais de 50%, o que poderá a levar a uma redução de custos muito significativa nos órgãos de manobra. No entanto, os valores do modelo em CFD terão de ser cuidadosamente analisados e confirmados antes de serem usados na prática.

CAPÍTULO

6

Caso de estudo real

Neste capítulo é analisada uma comporta em fase de projecto com dimensões reais. Efectua-se a comparação entre o modelo analítico e o modelo CFD para uma geometria simplificada e entre a geometria simplificada e a geometria real com o modelo em CFD.

6. Caso de estudo real

Neste capítulo efectua-se a análise de uma comporta à escala de 1:1, com o objectivo de verificar as diferenças entre o modelo analítico e o modelo em CFD com volumes finitos. A geometria real de uma comporta nem sempre é possível de analisar analiticamente devido à sua complexidade, pelo que é necessário efectuar algumas simplificações. No entanto, a análise em CFD com volumes finitos não apresenta essa limitação, sendo possível analisar qualquer geometria, pelo que se analisa a geometria simplificada usada no cálculo analítico e a geometria real da comporta, a fim de verificar se a simplificação, normalmente, usada na prática é válida em termos de cálculo.

6.1. Geometria da comporta

A comporta seleccionada encontra-se em fase de projecto e servirá como comporta de segurança de descarga de fundo de um aproveitamento hidroeléctrico em construção.

A conduta onde a comporta será instalada tem uma secção de 2 m x 2,5 m com uma conduta de arejamento imediatamente a jusante da comporta com 0,5 m de diâmetro.

O perfil geral da instalação é apresentado na Figura 6.1, e o pormenor da geometria da comporta na Figura 6.2.

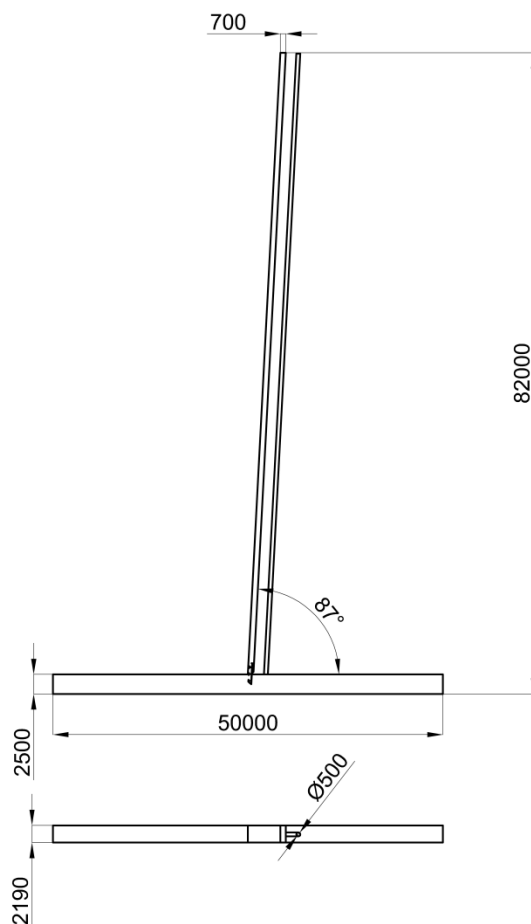


Figura 6.1 – Geometria real da conduta

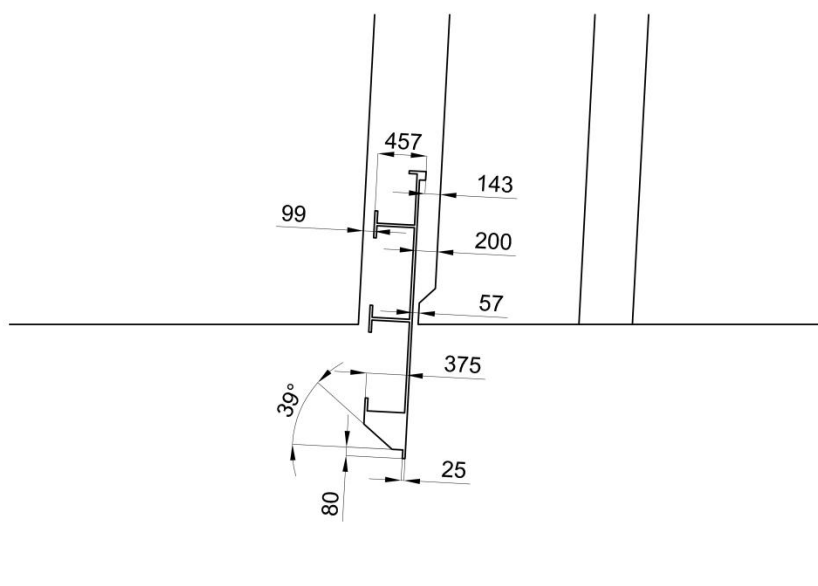


Figura 6.2 – Geometria real da comporta

Como já foi referido anteriormente, esta geometria não é possível de ser analisada analiticamente, devido à sua complexidade, pelo que se efectuaram algumas simplificações, resultando na geometria apresentada na Figura 6.3 e Figura 6.4.

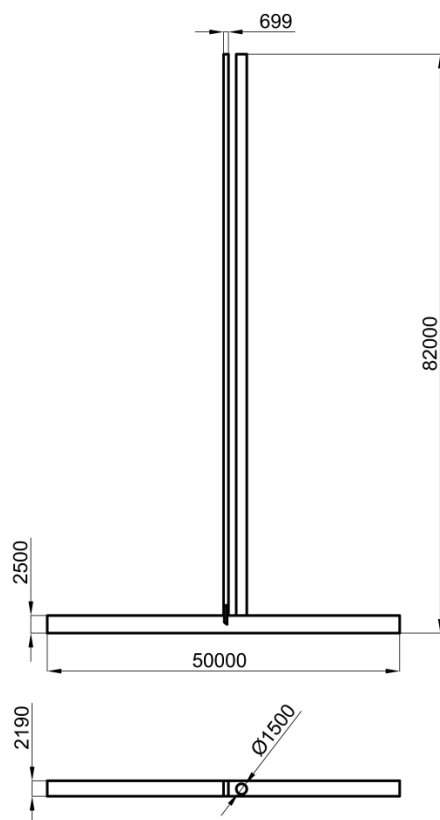


Figura 6.3 – Geometria da conduta simplificada

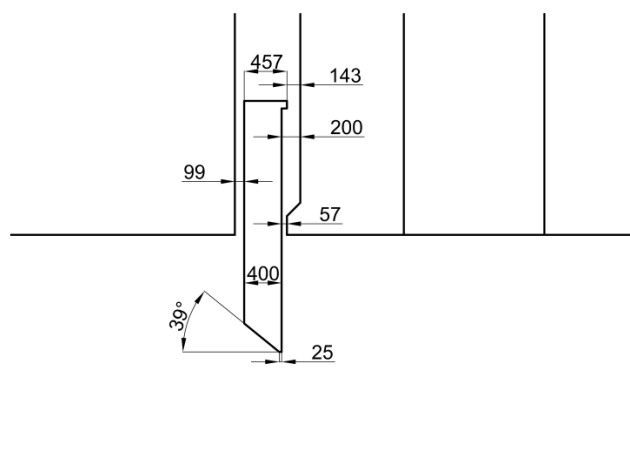


Figura 6.4 – Geometria da comporta simplificada

6.2. Cálculo

6.2.1. Modelo analítico

Para a realização do cálculo pelo modelo analítico, apresentado no capítulo 3, são necessários alguns dados e algumas dimensões, que são apresentados na Tabela 6.1, na Figura 6.3 e na Figura 6.4.

Tabela 6.1 – Dados para o cálculo do *downpull*

Dados fornecidos		
Símbolo	Descrição	Valor
H	Altura da coluna de água	58 m
Q	Caudal máximo	125 m ³ /s
y0	Altura da conduta	2,5 m
B0	Largura da conduta	2 m
A	Área da conduta	5 m ²
B	Largura da comporta em carga	2,19 m
a1	Folga a montante	0,099 m
a2	Largura da vedação a jusante	0,057 m
a'2	Recesso a jusante	0,2 m
a"2	Zona contraída a jusante	0,143 m
As	Área da vedação superior	0,12483 m ²
e	Altura do bordo inferior	0,08 m
d	Espessura da comporta	0,375 m
d'	Espessura da chapa de face	0,025 m
r	Raio do bordo de ataque	0 m
θ	Angulo de entrada	39 °
ρ	Peso específico da água	998 kg/m ³
g	Aceleração da gravidade	9,81 m/s ²

Dados assumidos		
Δp/γ		0 Pa
Ce		0,03
α'2		1
C"2		0,6

A aplicação das fórmulas apresentadas no capítulo 3 com os valores apresentados na Tabela 6.1 e retirados do gráfico da Figura 3.6, resulta nos valores do *downpull* apresentados na Tabela 6.2, para aberturas de 5% em 5%.

Tabela 6.2 – Valores do *downpull*

y/y0	y (m)	Cc	Vj (m/s)	kt	kb	Fd1 (kN)	Fd2 (kN)	Fd3 (kN)	Fd (kN)
0,00	0,001	0,61	33,45	0,75	1,00	114,99	-22,96	-70,88	21,14
0,05	0,13	0,61	33,43	0,75	0,86	49,99	-22,93	-52,29	-25,23
0,10	0,25	0,61	33,41	0,75	0,73	-9,92	-22,90	-52,22	-85,04
0,15	0,38	0,61	33,39	0,75	0,62	-60,48	-22,87	0,00	-83,36
0,20	0,50	0,62	33,36	0,75	0,53	-100,73	-22,84	0,00	-123,57
0,25	0,63	0,62	33,34	0,75	0,46	-131,43	-22,81	0,00	-154,24
0,30	0,75	0,62	33,32	0,75	0,41	-154,01	-22,78	0,00	-176,79
0,35	0,88	0,63	33,29	0,75	0,38	-169,86	-22,74	0,00	-192,60
0,40	1,00	0,63	33,27	0,75	0,35	-180,01	-22,71	0,00	-202,72
0,45	1,13	0,64	33,24	0,75	0,34	-185,03	-22,67	0,00	-207,70
0,50	1,25	0,65	33,22	0,75	0,34	-185,13	-22,64	0,00	-207,77
0,55	1,38	0,66	33,19	0,75	0,35	-180,37	-22,60	0,00	-202,97
0,60	1,50	0,66	33,16	0,75	0,37	-170,85	-22,56	0,00	-193,42
0,65	1,63	0,68	33,13	0,75	0,40	-156,91	-22,52	0,00	-179,43
0,70	1,75	0,69	33,10	0,75	0,44	-139,18	-22,48	0,00	-161,66
0,75	1,88	0,70	33,07	0,75	0,49	-118,46	-22,43	0,00	-140,90
0,80	2,00	0,72	33,03	0,75	0,54	-95,31	-22,38	0,00	-117,69
0,85	2,13	0,75	32,98	0,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,90	2,25	0,79	32,93	0,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,95	2,38	0,84	31,45	0,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,00	2,50	0,90	27,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

6.2.2. Modelo em CFD com volumes finitos

A construção do modelo e respectiva análise foram efectuados de acordo com o descrito no ponto 4.2. Para ambos os modelos foi utilizada uma malha com tamanho base de 400 mm e com 40 mm no volume de controlo criado na zona envolvente à comporta, resultando numa malha de volume com perto de trezentas mil células. A selecção do tamanho da malha foi condicionada pelo *hardware* disponível e tempo necessário à semelhança do descrito no ponto 5.4.

6.2.2.1. Modelo simplificado

Apresentam-se, de seguida, os resultados obtidos com o modelo simplificado para a abertura de 40%, para a qual se obteve o *downpull* máximo. Os resultados das restantes aberturas são apresentados no anexo 4.

A geometria em estudo encontra-se representada na Figura 6.3 e na Figura 6.4.

Na Figura 6.5 está representada uma perspectiva do modelo com a malha de volume, na qual se evidencia a zona do volume de controlo.

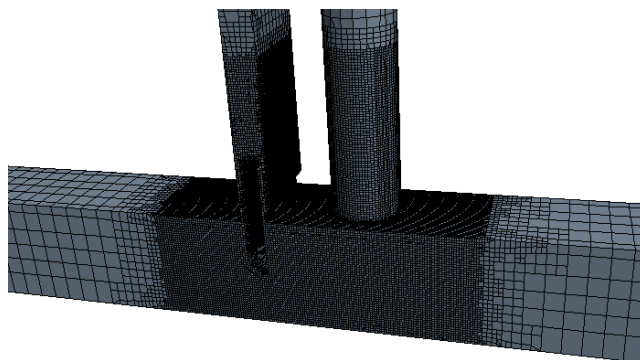


Figura 6.5 – Malha de volume

Resultados

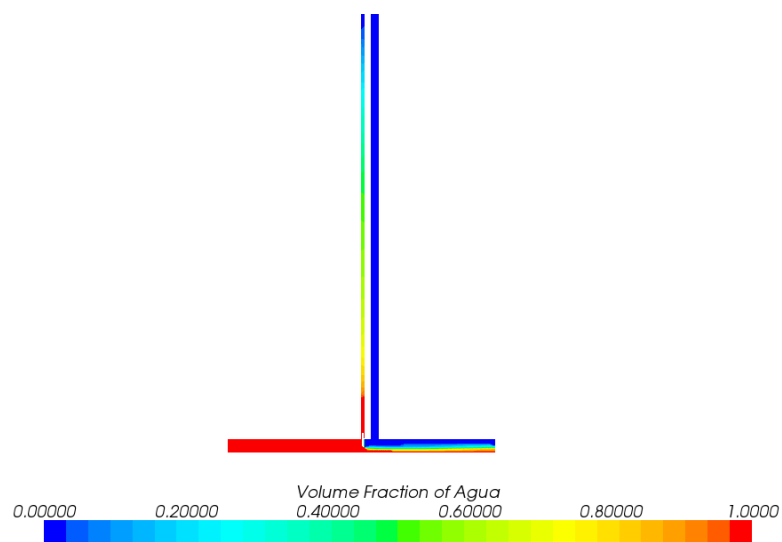


Figura 6.6 – Volume de água e ar

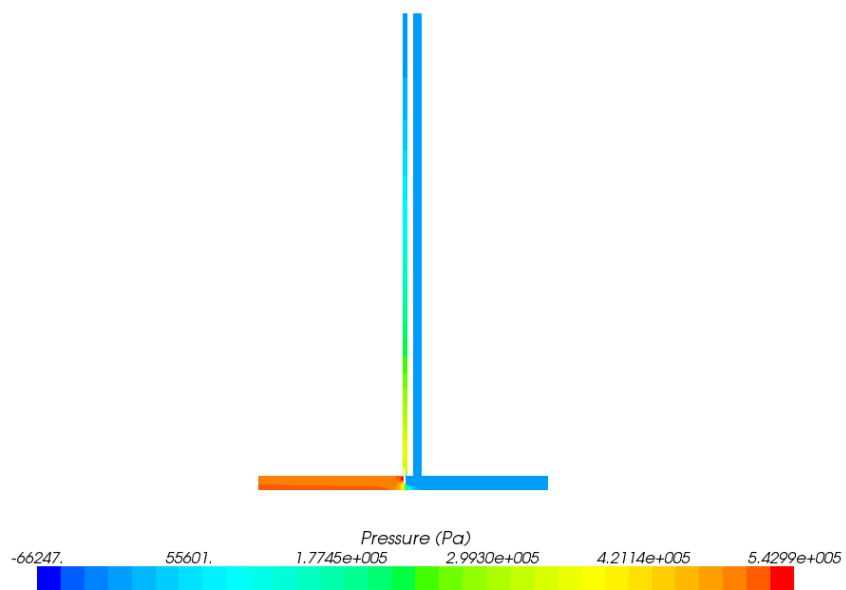


Figura 6.7 – Pressão

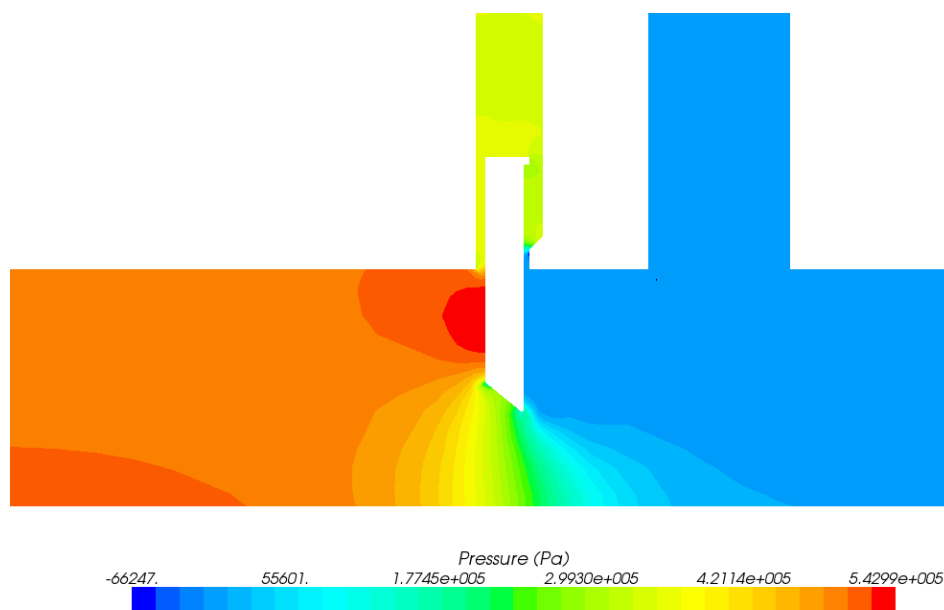
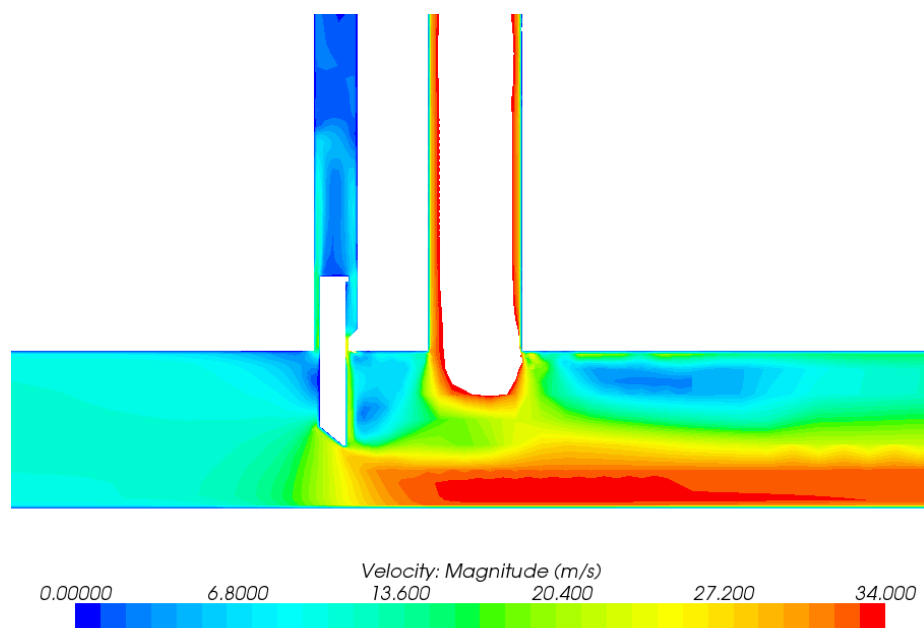
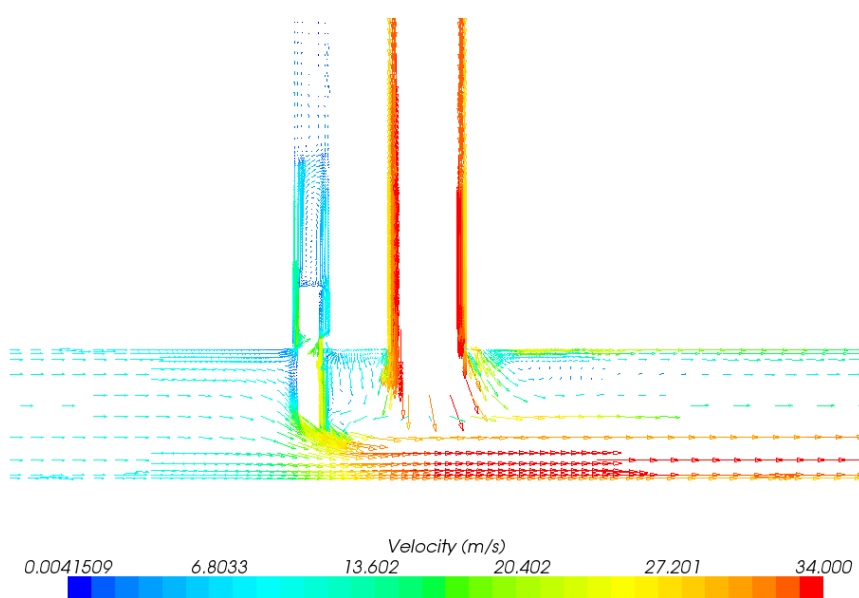


Figura 6.8 – Pressão – zona envolvente à comporta

**Figura 6.9 – Velocidade (escalar)****Figura 6.10 – Velocidade (vectorial)**

O valor máximo da escala da velocidade foi ajustado, de modo a realçar a velocidade do escoamento imediatamente a jusante da comporta, ocultando assim, a velocidade do ar na conduta de arejamento.

Na Tabela 6.3 apresentam-se os valores do *downpull* para as diferentes aberturas analisadas.

Tabela 6.3 – Resultados dos ensaios do modelo simplificado

Abertura (%)	Fd (kN)
5	-168
10	-4
15	-26
20	-58
30	-100
40	-118
50	-113
60	-115
70	-57
80	0
90	95

6.2.2.2. Modelo real

Apresentam-se de seguida os resultados obtidos com o modelo simplificado para a abertura de 30%, para a qual se obteve o *downpull* máximo. Os resultados das restantes aberturas são apresentados no anexo 5. A geometria em estudo encontra-se representada na Figura 6.1 e na Figura 6.2.

Na Figura 6.11 está representada uma perspectiva do modelo com a malha de volume, na qual se evidencia a zona do volume de controlo.

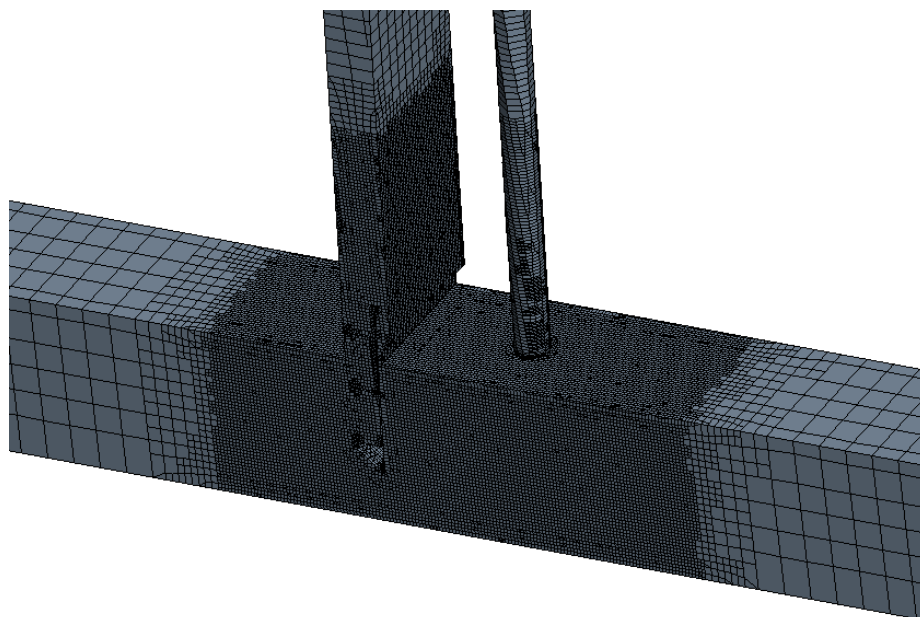


Figura 6.11 – Malha de volume

Resultados

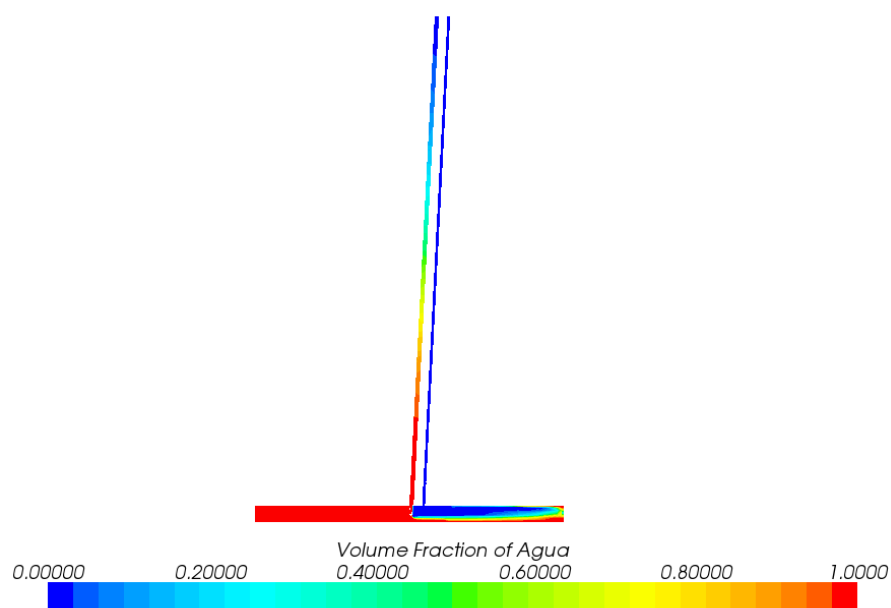


Figura 6.12 – Volume de água e ar

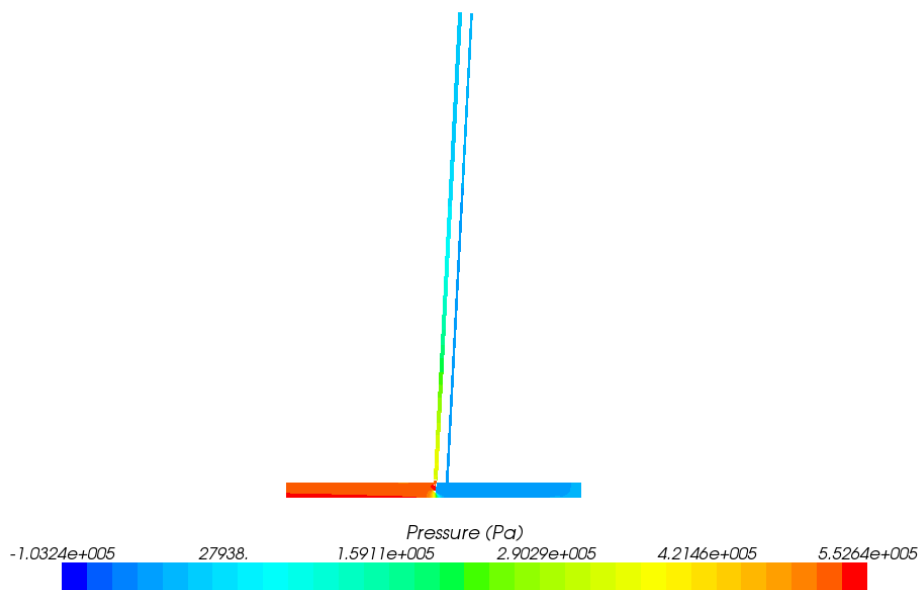


Figura 6.13 – Pressão

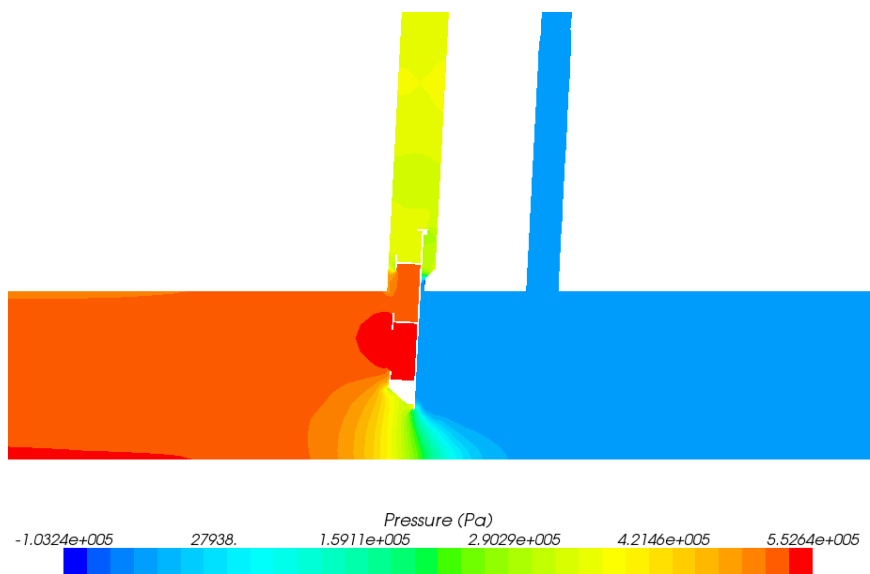


Figura 6.14 – Pressão – zona envolvente à comporta

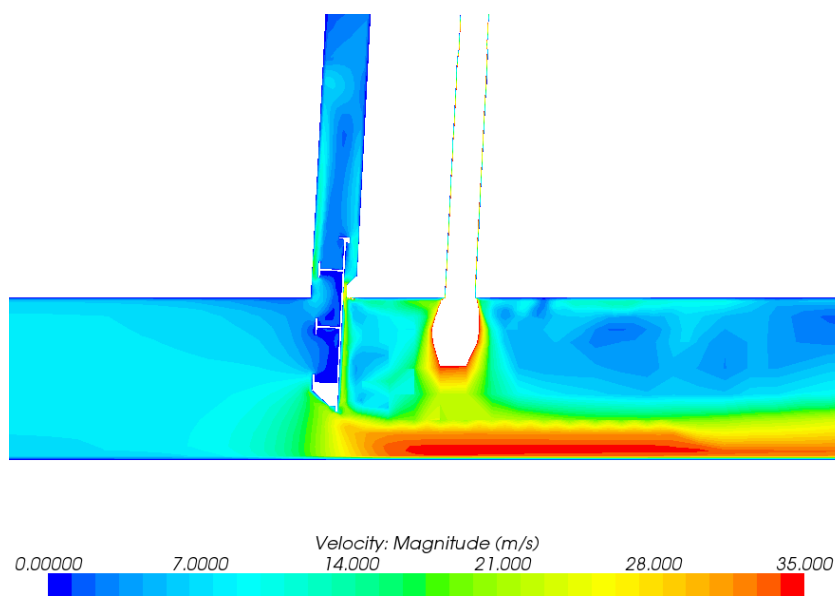


Figura 6.15 – Velocidade (escalar)

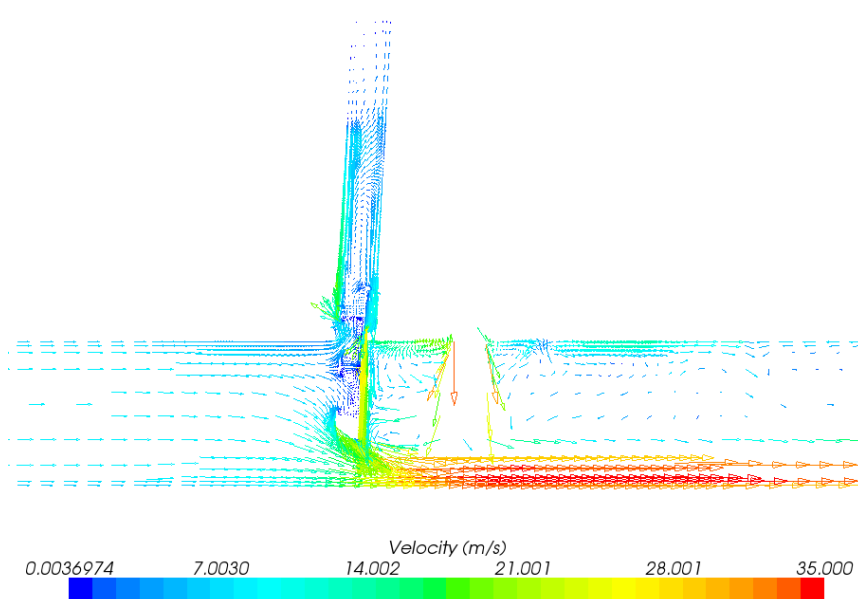


Figura 6.16 – Velocidade (vectorial)

O valor máximo da escala da velocidade foi ajustado, de modo a realçar a velocidade do escoamento imediatamente a jusante da comporta, ocultando assim, a velocidade do ar na conduta de arejamento.

Na Tabela 6.4 apresentam-se os valores do *downpull* para as diferentes aberturas analisadas.

Tabela 6.4 – Resultados dos ensaios do modelo real

Abertura (%)	Fd (kN)
5	-307
10	-98
15	-140
20	-155
30	-180
40	-155
50	-125
60	-70
70	-50
80	35
90	110

6.3. Análise de resultados

Os resultados obtidos pelo modelo analítico e pelos modelos CFD com volumes finitos são apresentados na Tabela 6.5 e sob a forma de gráfico na Figura 6.17 para uma melhor visualização dos resultados.

Tabela 6.5 – Resultados obtidos

Abertura (%)	Fd - Analítico (kN)	Fd - CFD Simp. (kN)	Fd - CFD Real (kN)
0	21,39		
5	-25,30		
10	-85,28	-4	-98
15	-83,59	-26	-140
20	-123,92	-58	-155
25	-154,67		
30	-177,28	-100	-180
35	-193,15		
40	-203,29	-118	-155
45	-208,29		

50	-208,36	-113	-125
55	-203,55		
60	-193,96	-115	-70
65	-179,94		
70	-162,12	-57	-50
75	-141,30		
80	-118,03	0	35
85			
90		95	110
95			
100			

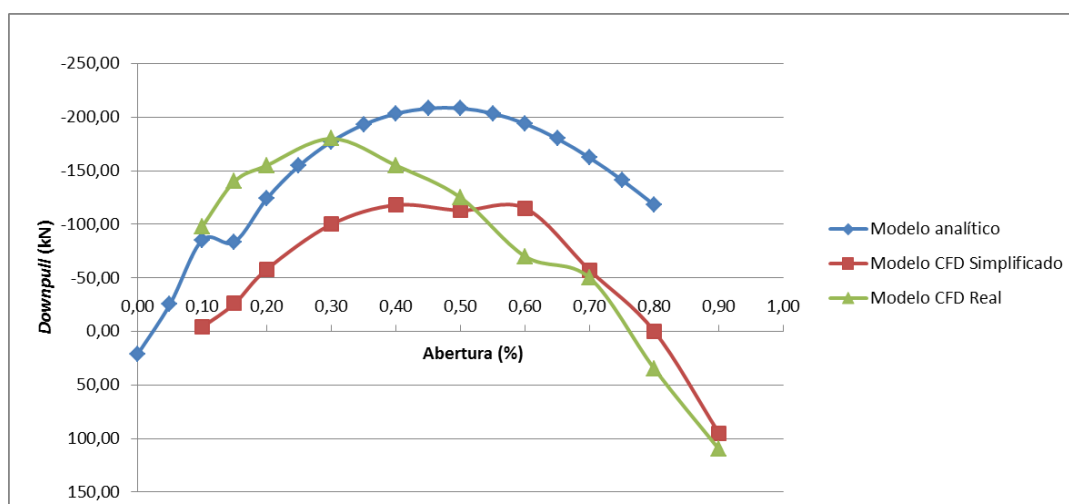


Figura 6.17 – Gráfico com resumo de resultados

Observando a Figura 6.17 verifica-se, que para a comporta simplificada existe uma semelhança na forma da curva representativa do *downpull* em função da abertura, havendo, no entanto, uma diferença de valores de cerca de 45% na zona de *downpull* máximo tendo como referência o modelo analítico.

A comporta simplificada e a comporta real, analisadas pelo modelo de volumes finitos, apresentam curvas características do *downpull* em função da abertura distintas, a comporta simplificada apresenta uma zona de *downpull* máximo com valores idênticos entre as aberturas de 40% e 60%, enquanto que a comporta real apresenta uma zona pontual de *downpull* máximo para a abertura de 30%. Comparando os valores máximos do *downpull* para as duas comportas o modelo

real é 53% superior ao modelo simplificado. Esta diferença é significativa, mas, no entanto, é 14% inferior ao valor máximo do *downpull* para o modelo analítico.

À semelhança do efectuado no capítulo 5, comparou-se a velocidade do escoamento na zona contraída a jusante da comporta no sentido de validar os valores obtidos. Comparando a Tabela 6.5, a Figura 6.9 e a Figura 6.15 verifica-se que a velocidade oscila entre os 33 m/s e os 35 m/s, não sendo esta variação suficiente para justificar a diferença dos valores do *downpull*.

Para utilização imediata em projectos reais, como é o caso desta comporta é utilizado o modelo analítico que se verificou no capítulo 5 ser um modelo conservativo, oferecendo por isso segurança no dimensionamento dos órgãos de manobra. O modelo de volumes finitos mostra que seria possível reduzir os custos devido à obtenção de um *downpull* inferior, mas dada a importância deste factor na segurança das barragens estes valores necessitam de ser confirmados com novos estudos e ensaios para serem aceites nos projectos.

À semelhança do indicado no capítulo 5, também, nesta comporta se verificou uma diferença muito significativa no tempo necessário para efectuar o cálculo do *downpull* pelo modelo analítico e pelo modelo de volumes finitos, sendo necessários cerca de 10 minutos para o modelo analítico e cerca de 5 dias para o modelo de volumes finitos.

CAPÍTULO

7

Conclusões e Trabalhos Futuros

Neste capítulo apresentam-se as principais conclusões obtidas com a realização deste trabalho e indicam-se possíveis pontos e temas a desenvolver no futuro.

7. Conclusões e Trabalhos Futuros

7.1. Conclusões

Ao longo deste trabalho é importante reter que o controlo do *downpull* é um processo fundamental para a optimização do esforço de manobra (redução de custos) e para garantir a preponderância de fecho (fecho em situações de emergência). Se por um lado para que o esforço de manobra seja o menor possível o *downpull* também deverá ser o menor possível, por outro lado a preponderância de fecho exige que o valor do *downpull* seja significativo, pelo que estes dois aspectos têm de ser tratados em conjunto. Ou seja, o *downpull* tem de ser suficiente para garantir a preponderância de fecho e, simultaneamente, ter o menor valor possível para reduzir o esforço de manobra e custos associados.

Destacam-se abaixo os parâmetros geométricos que, mais facilmente, permitem o controlo do *downpull*.

- a) θ - Ângulo de inclinação da face inferior: este parâmetro situa-se, normalmente entre os valores de 30° e 45° e a sua variação influencia de forma muito significativa o coeficiente K_b e, consequentemente, o *downpull*. Este ângulo é, no entanto, muitas vezes condicionado pela estrutura da comporta e localização das rodas.
- b) d' – Espessura da chapa de face / posição do cutelo: este parâmetro representa a espessura da chapa de face quando a posição do cutelo é coincidente com a face de jusante e representa a distância entre a aresta de montante do cutelo e a chapa de face nos casos em que o cutelo se encontra numa posição intermédia entre a face de montante e jusante. Quanto mais para montante estiver posicionado o cutelo, menor é a área em contacto com a face inferior e, consequentemente, maior o *downpull*.
- c) a_1 – Folga a montante da comporta: esta folga é a distância entre a face de montante da comporta e a parede montante do poço. Esta folga permite um grande controlo do *downpull*, mas apenas em novos empreendimentos, em

que o projectista da comporta indica à construção civil as dimensões do poço. Nos empreendimentos existentes em que se faz apenas reabilitação / optimização das comportas este parâmetro tem um valor definido e não pode ser modificado.

Apresentam-se abaixo de forma esquemática as implicações no *downpull*, provocadas pela variação dos parâmetros acima referidos.

$$\uparrow \theta \Rightarrow \uparrow k_B \Rightarrow \downarrow F_d$$

$$\uparrow d' \Rightarrow \uparrow F_d$$

$$\uparrow a_1 \Rightarrow \uparrow F_d$$

Os resultados obtidos foram satisfatórios para o modelo analítico e surpreendentes para o modelo em CFD com volumes finitos.

O capítulo 5 permitiu concluir que o modelo analítico desenvolvido apresenta resultados conservativos relativamente a um ensaio experimental (49%), o que permite uma utilização segura e com confiança deste modelo na prática. Com o modelo em CFD com volumes finitos obtiveram-se valores de *downpull* inferiores aos verificados no ensaio experimental (39%), mas uma semelhança na forma de variação em função da abertura. Esta diferença permitiria, à partida, uma poupança de custos nos órgãos de manobra, mas contudo, não oferece total segurança, necessitando de ser confirmada futuramente com novos ensaios e novos modelos.

A análise à comporta em escala real permitiu confirmar a diferença de magnitude entre os dois modelos e a semelhança na forma de variação em função da abertura.

Um outro aspecto fundamental é o tempo despendido com cada modelo para a obtenção de resultados. Enquanto que, com o modelo analítico são necessários poucos minutos para se determinar o *downpull* de uma determinada comporta e optimizá-la em função dos objectivos pretendidos, com o modelo em CFD com volumes finitos é necessário cerca de uma semana para a obtenção de resultados, sendo este tempo multiplicado pelo número de novas geometrias necessárias à optimização do modelo.

O tempo necessário à obtenção de resultados pelo modelo em CFD com volumes finitos, inviabiliza a utilização deste modelo em fases de proposta ou em fases iniciais de projecto, dado que, por vezes, a sua geometria vai variando devido a questões estruturais ou mesmo por questões alheias ao projectista, sendo que a necessidade de resultados é sempre com a maior brevidade possível.

As maiores dificuldades encontradas ao longo deste trabalho foi a obtenção de bibliografia sobre o tema e o desenvolvimento do modelo em CFD.

7.2. Desenvolvimentos futuros

Este trabalho, com o cálculo do *downpull*, contribui com a componente fundamental para o cálculo do esforço de manobra, sendo o passo seguinte o desenvolvimento das forças de atrito actuantes na comporta e posteriormente o dimensionamento do esforço de manobra.

Outro aspecto a desenvolver é o aperfeiçoamento e confirmação do modelo em CFD com volumes finitos, no sentido de se confirmar uma significativa redução de custos. Alternativamente / simultaneamente poderá ser desenvolvido um modelo bidimensional com elementos finitos, com o objectivo de uma redução significativa do tempo despendido.

Numa fase posterior e mais avançada, poderá ser desenvolvido um modelo dinâmico em CFD para o cálculo do *downpull*, em que a comporta vá variando de posição ao longo do ensaio, simulando a abertura ou fecho da comporta.

Referências Bibliográficas

1. INAG. Programa Nacional de Barragens com Elevado Potencial Hidroelétrico. **Instituto da Água I.P.**, 2011. Disponível em: <<http://pnbeiph.inag.pt/np4/home.html>>. Acesso em: 20 Julho 2011.
2. MARKOVIC, J. A High Head Gate Innovation Numerical and Experimental Analysis of Hydrodynamic Forces. **Scientific Journal - Series: Mathematical Modelling in Civil Engineering**, Bucharest, v. 6, no. 2, p. 27 - 34, June 2010.
3. JELL LIMA DE ANDRADE, J. C. A. **Análise dos esforços hidrocínâmicos em comportas hidráulicas**. Vitória: [s.n.]. 1997.
4. KHOSROJERDI, A. **Influence of Moving Bottom Outlet Gate on Downpull Force by FLOW3D**. AIP Conference Proceedings, Volume 1168. Rethymno, Crete, Greece: American Institut of Physics (AIP). 2009. p. pp. 609 - 612.
5. NAUDASCHER, E. **Hydrodynamic Forces**. Rotterdam: A. A. Balkema, 1991.
6. NAUDASCHER, E. Hydrodynamic Analysis for High-Head Leaf Gates. **Journal of Hydraulics Division**, May 1964. 155-191.
7. PAUL, T. C. . D. G. S. Dimensioning Vertical Lift Gates. **Water Power & Dam Construction**, November 1986. 45 - 47.
8. SAGAR, B. T. A. **Gate Lip Hydraulics**. 1999 IAHR Congress Proceedings Graz. Austria: IAHR. 1999.
9. AYDIN, I. Prediction of downpull on closing high head gates. **Journal of Hydraulic Research**, v. Vol. 44, No. 6, p. pp. 822-831, 2006.
10. B. T. A. SAGAR, J. P. T. Downpull on Vertical Lift Gates. **Water Power and Dam Construction**, localidade, 1979. 35-41.
11. ERBISTI, P. **Comportas Hidráulicas**. 2ª Edição. ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2002.
12. SAGAR, B. T. A. Downpull in High-Head Gate Installations - Part two. **Water Power & Dam Construction**, April 1977. 52-55.
13. A. KHOSROJERDI, M. R. K. **Two dimensional flow analysis through**

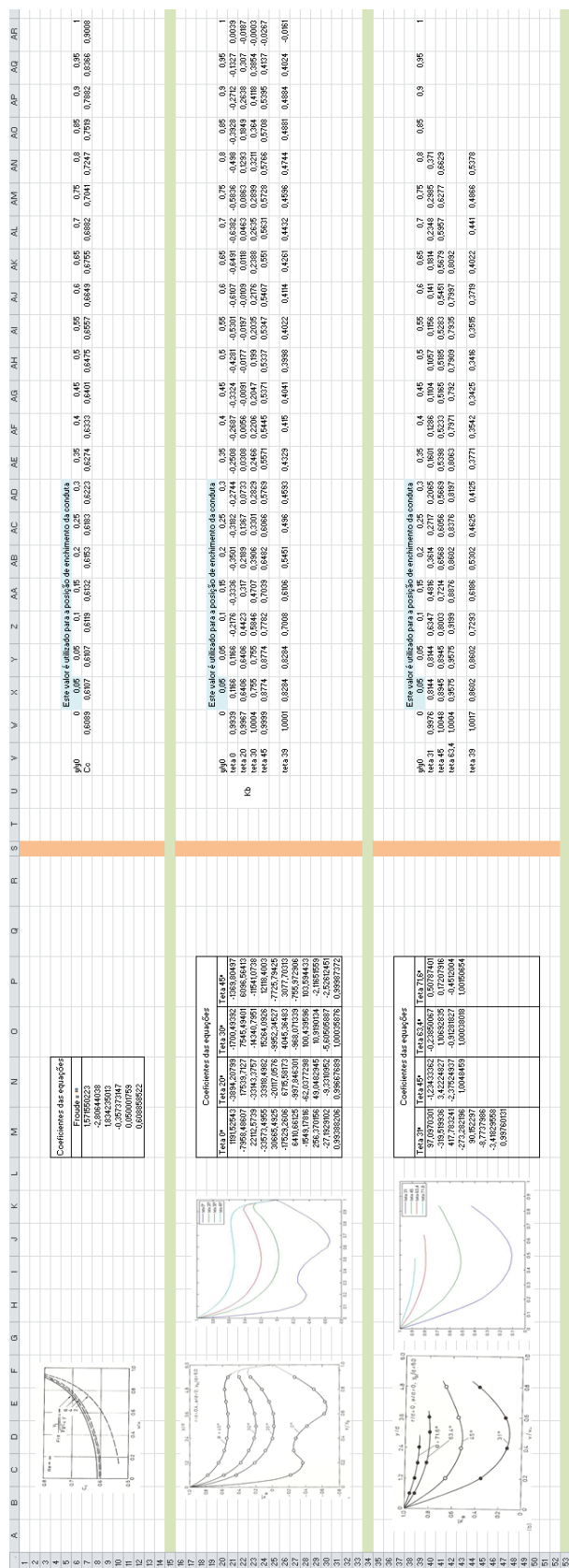
- bottom outlet gates by SIMPLE algorithm.** Hydroinformatics 2002. Cardiff, UK: IWA Publishing. 2002. p. pp. 117 - 125.
14. PRENNER, R. **Downpull Forces on Different High-Head Leaf Gate Types.** Hydrovision 2006. Portland / Oregon, USA: [s.n.]. 2006.
15. DGEG. **Renováveis - Estatísticas rápidas.** Direção Geral de Energia e Geologia. Lisboa. Junho de 2011. (76).

ANEXOS

Anexo 1 – Modelo analítico

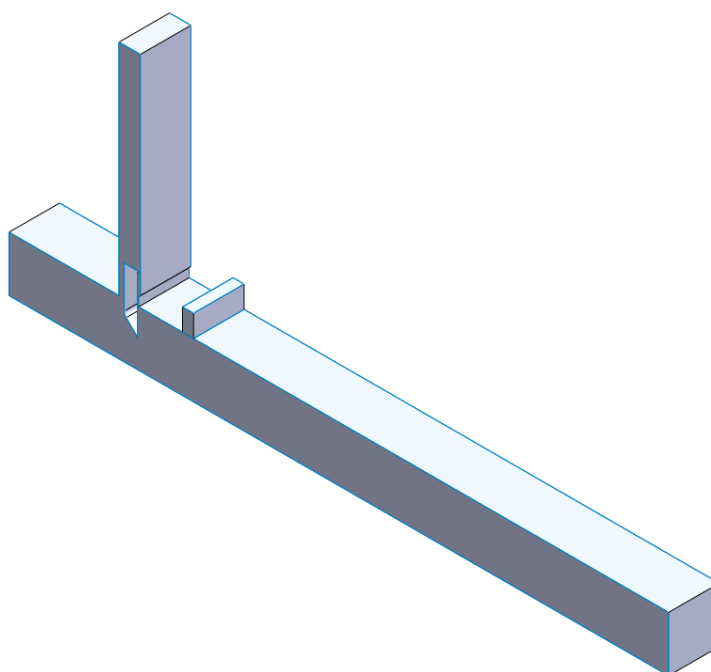
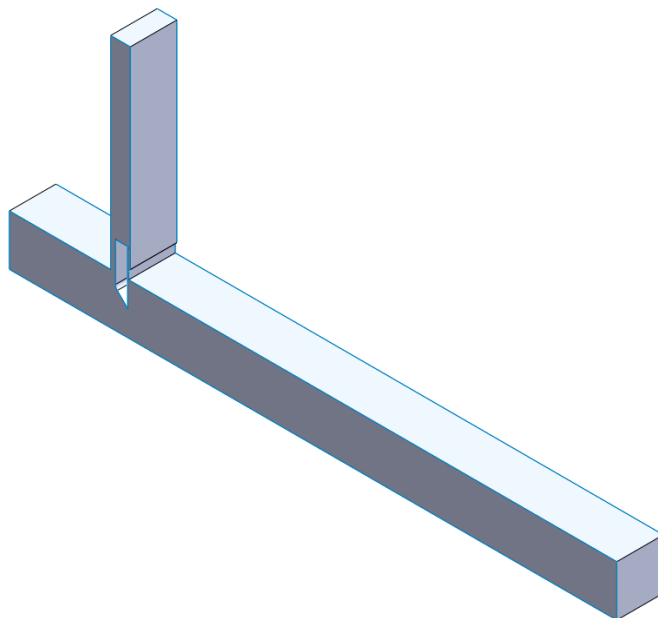
[illegible]

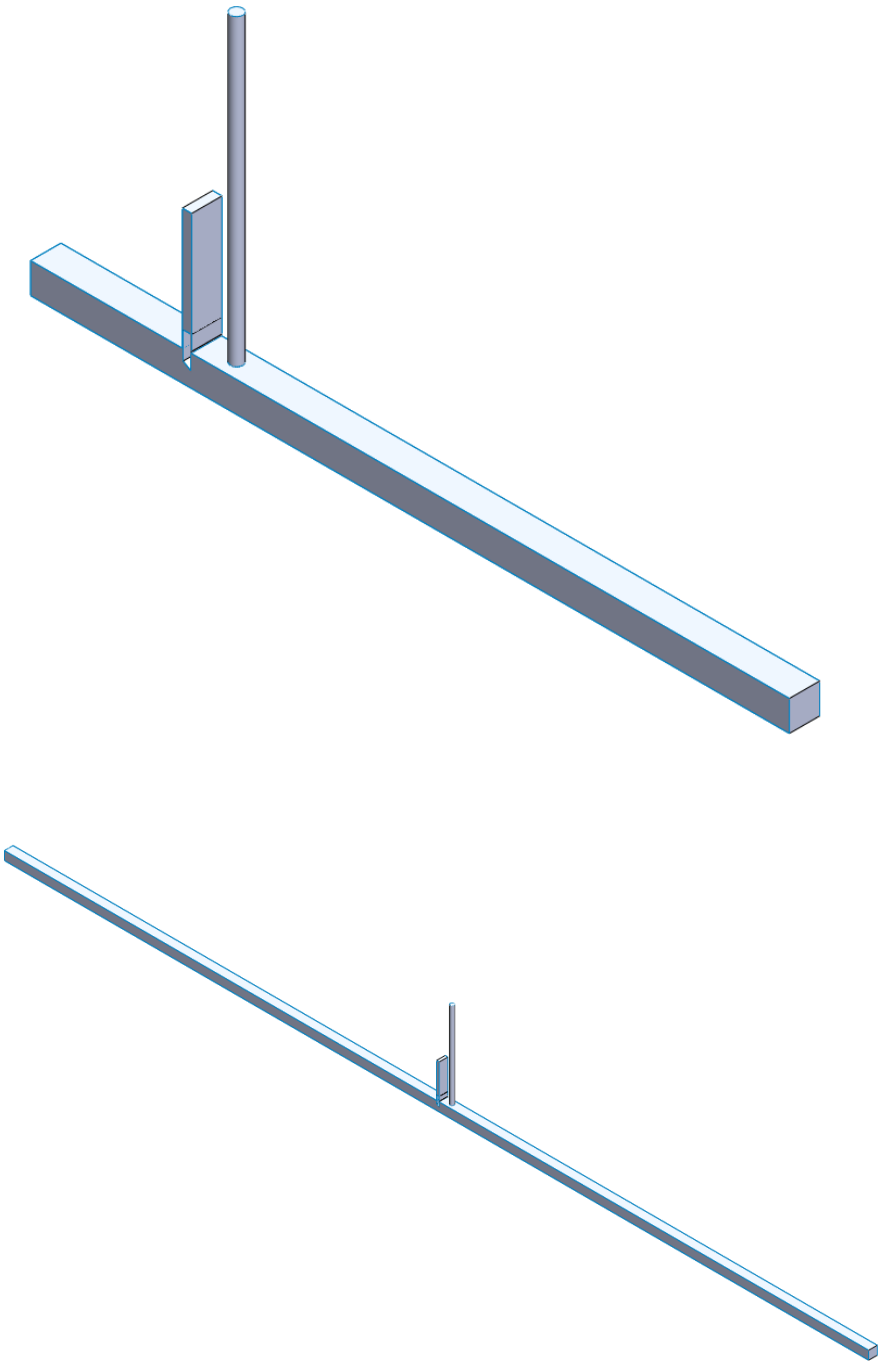
Folha de cálculo para obtenção do *downpull*

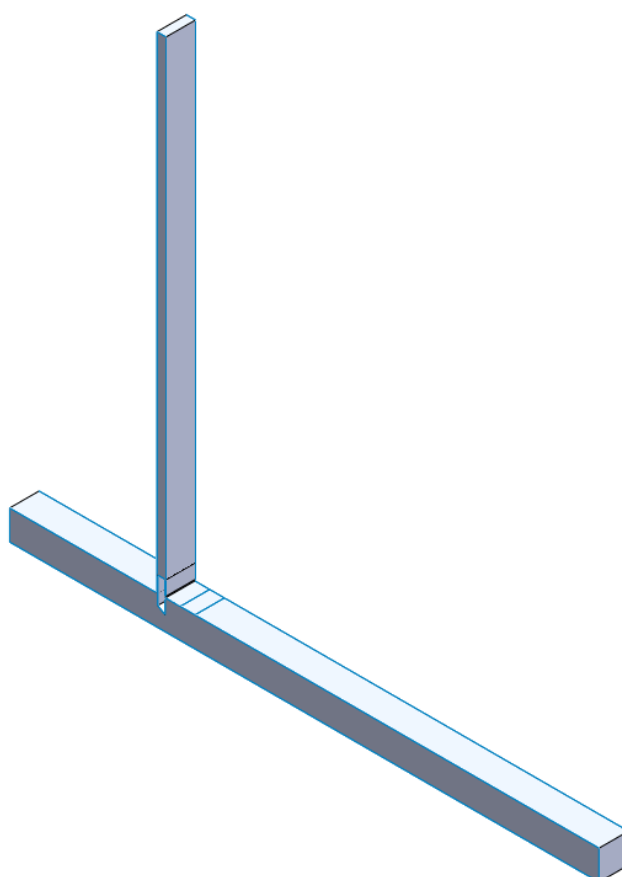
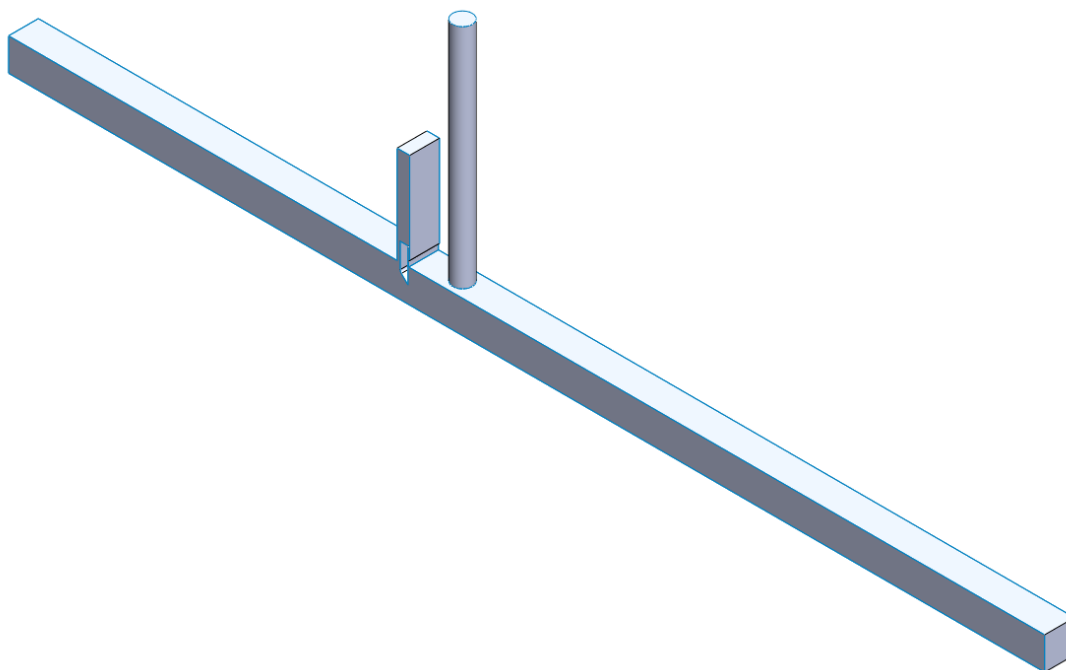


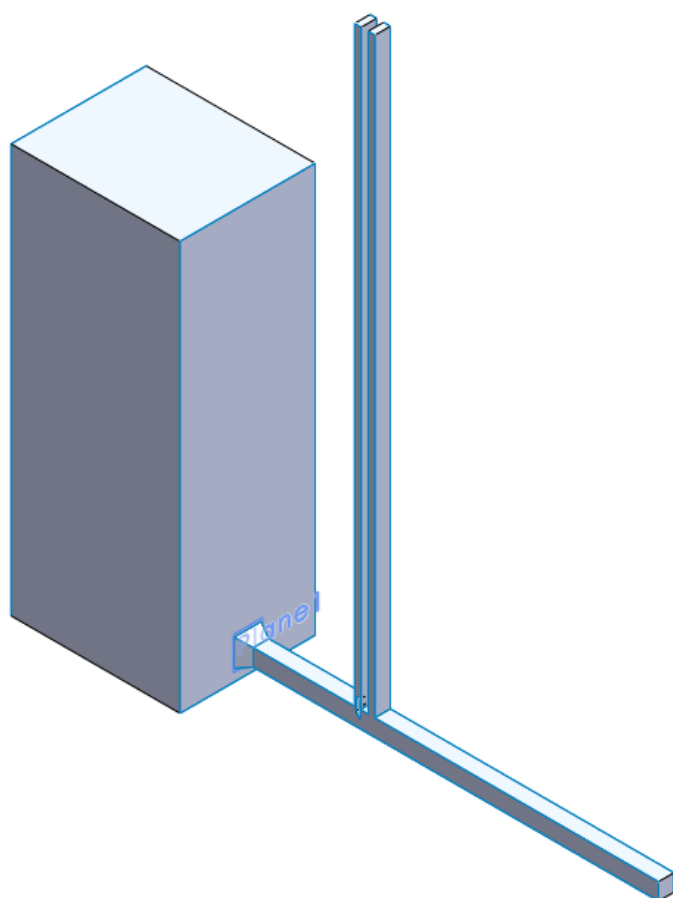
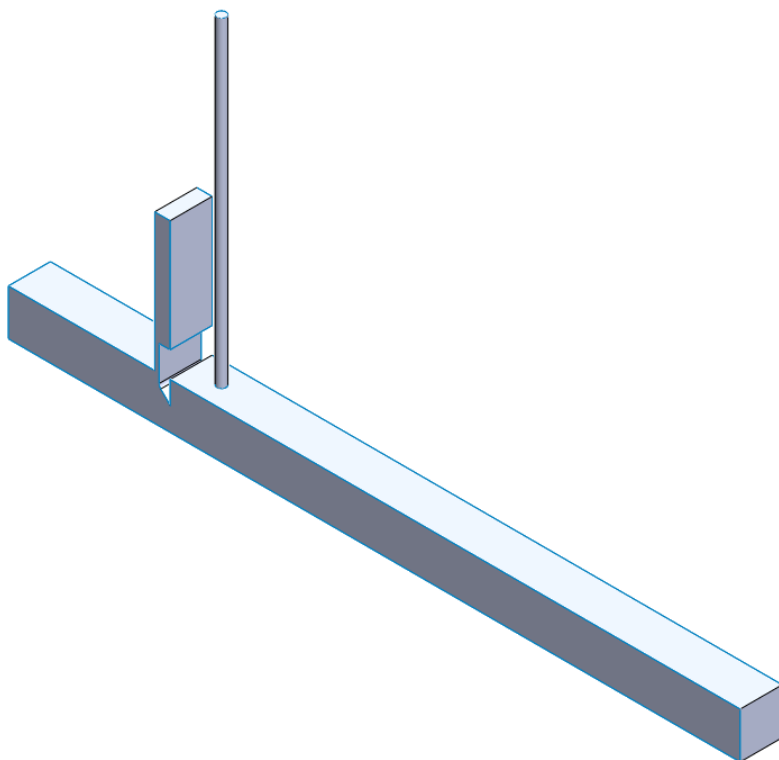
Anexo 2 – Geometrias desenvolvidas ao longo do trabalho

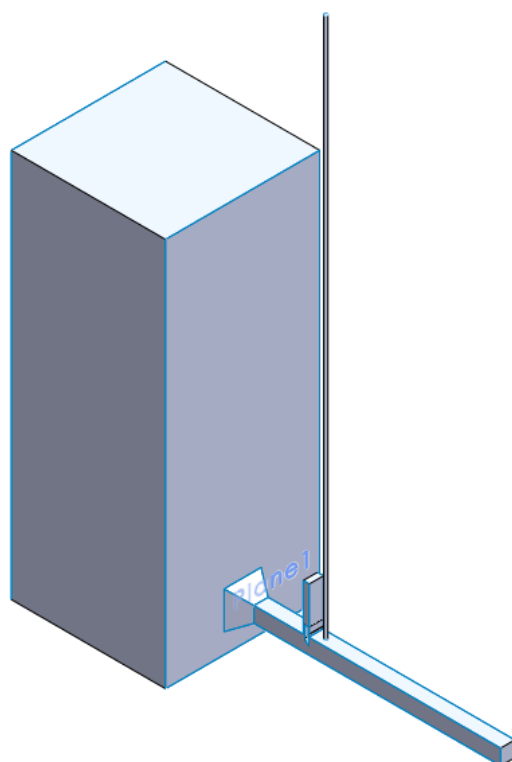
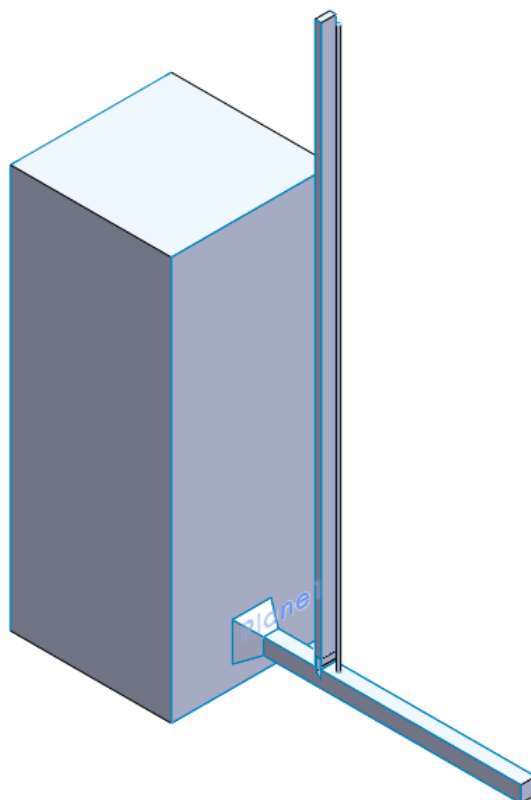
Apresentam-se abaixo as diferentes geometrias testadas ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

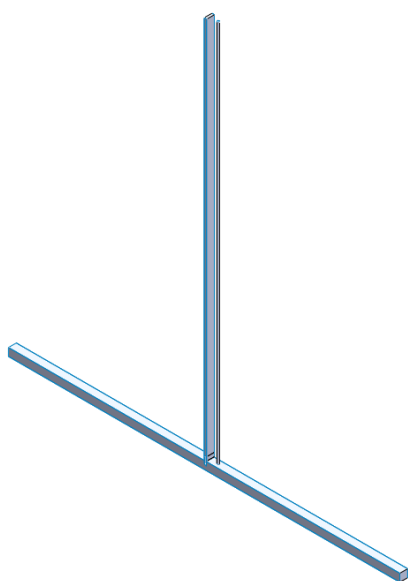
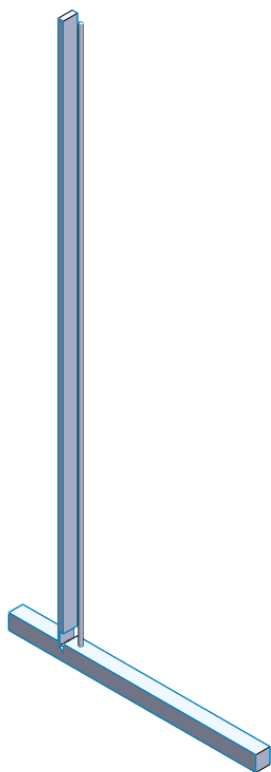


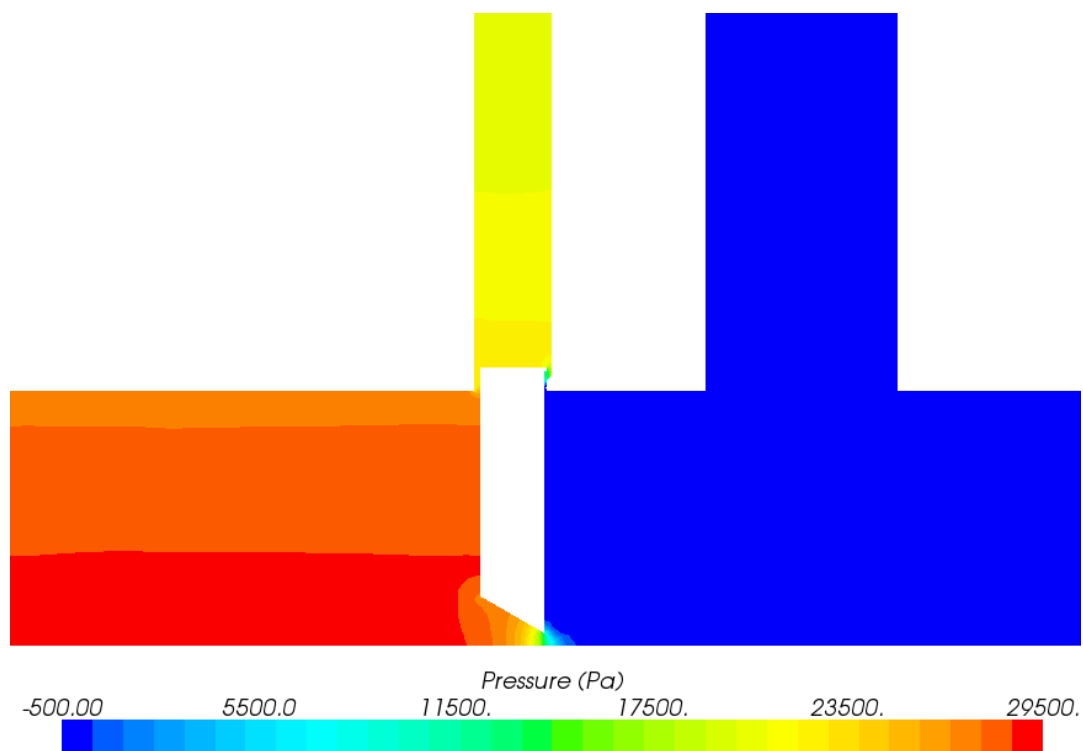




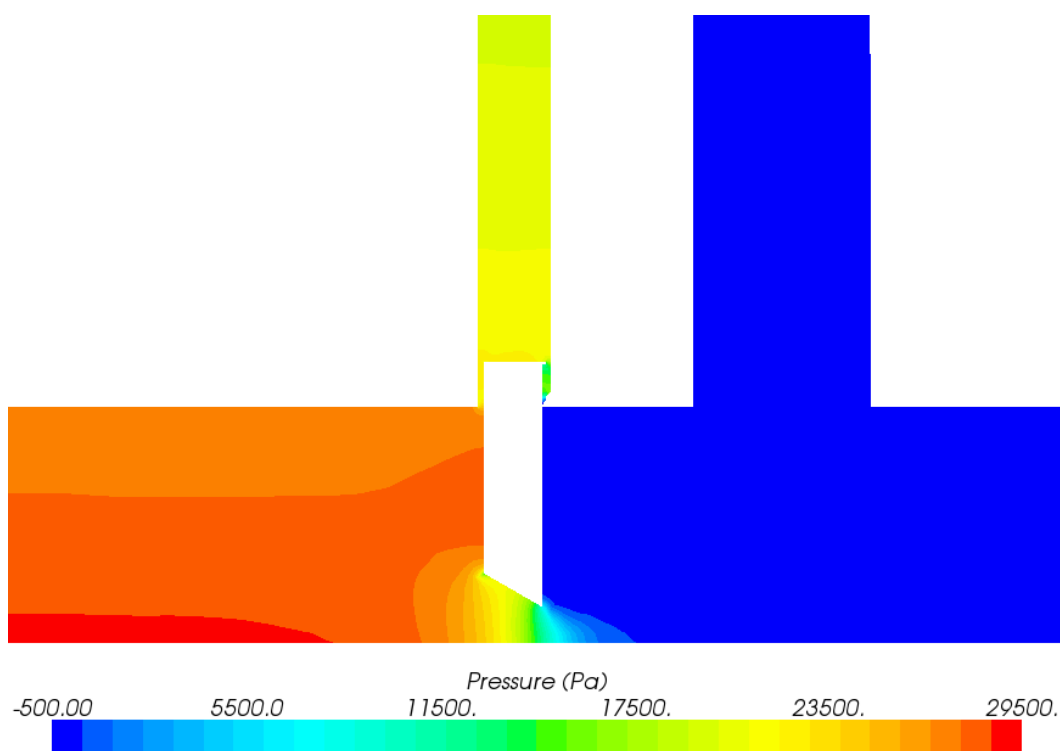




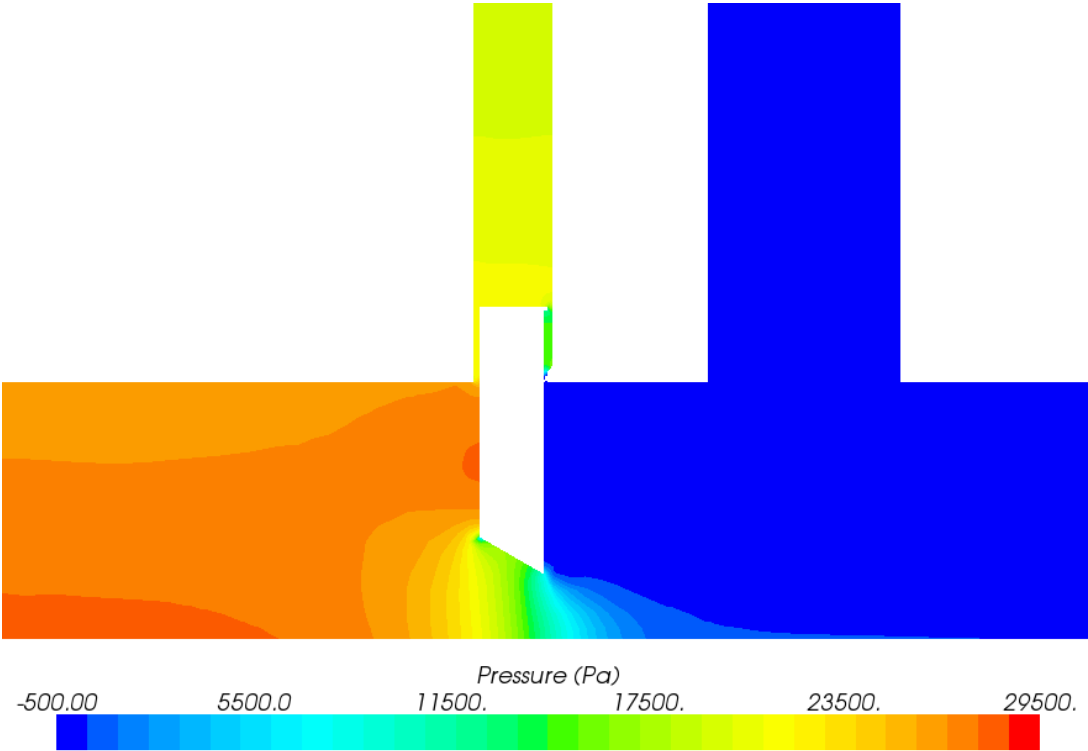


Anexo 3 – Resultados obtidos pelo modelo em CFD para o modelo reduzido

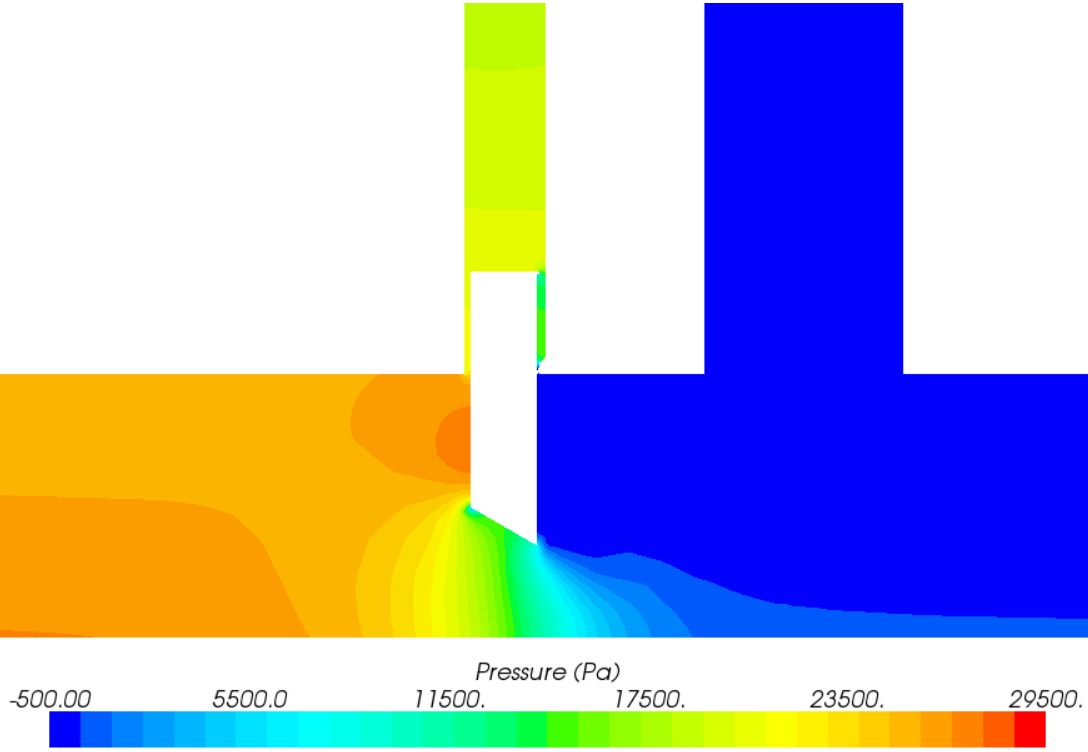
Pressão para a abertura de 5%



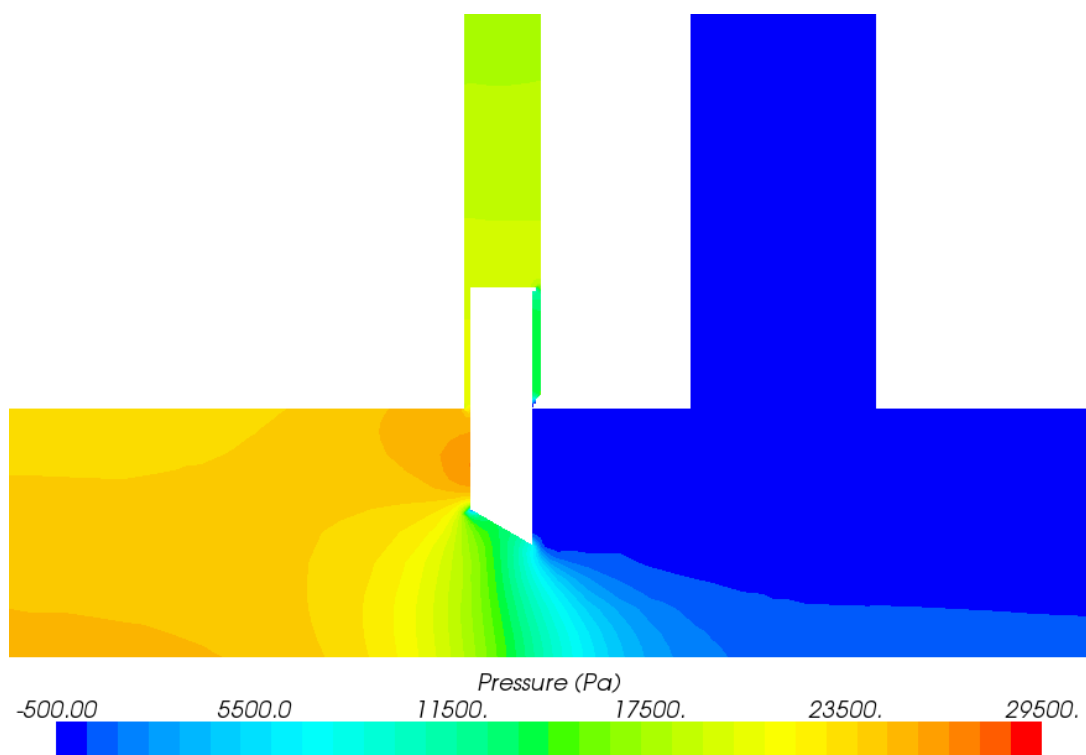
Pressão para a abertura de 15%



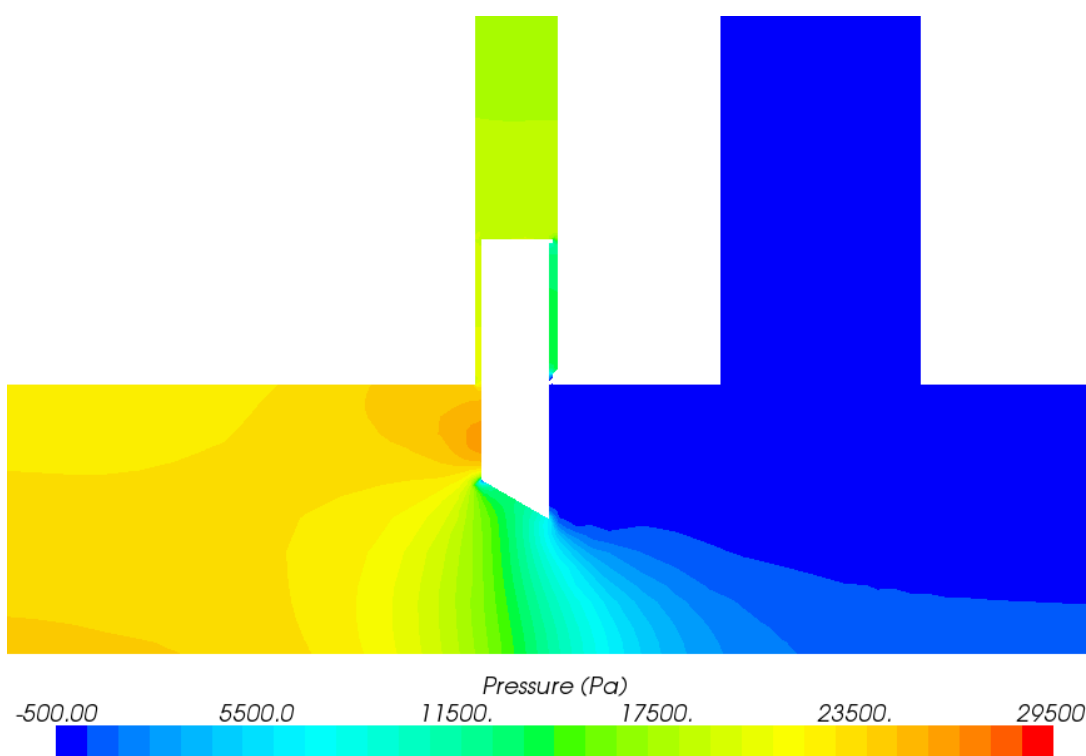
Pressão para a abertura de 25%



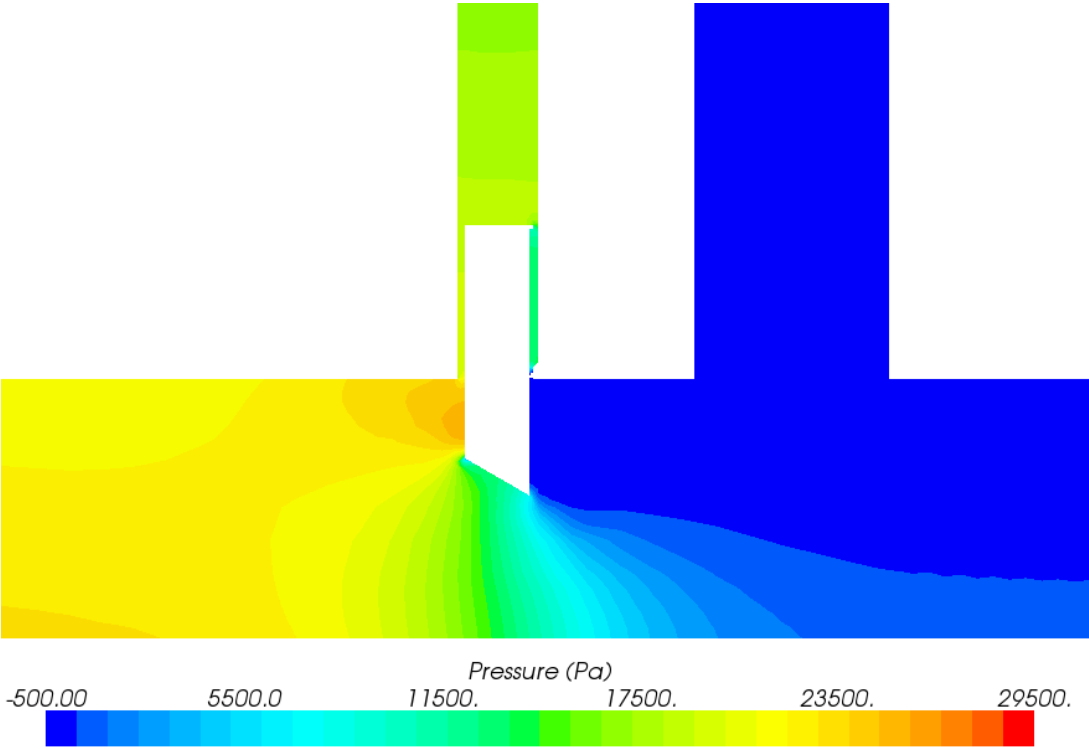
Pressão para a abertura de 35%



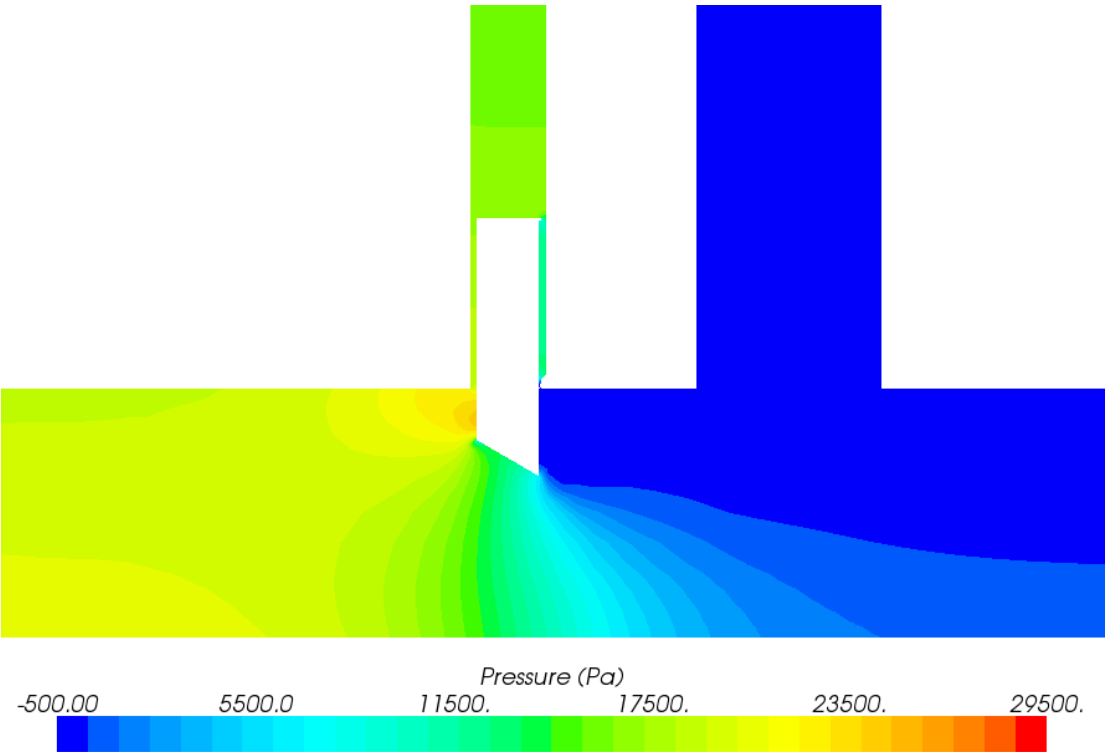
Pressão para a abertura de 45%



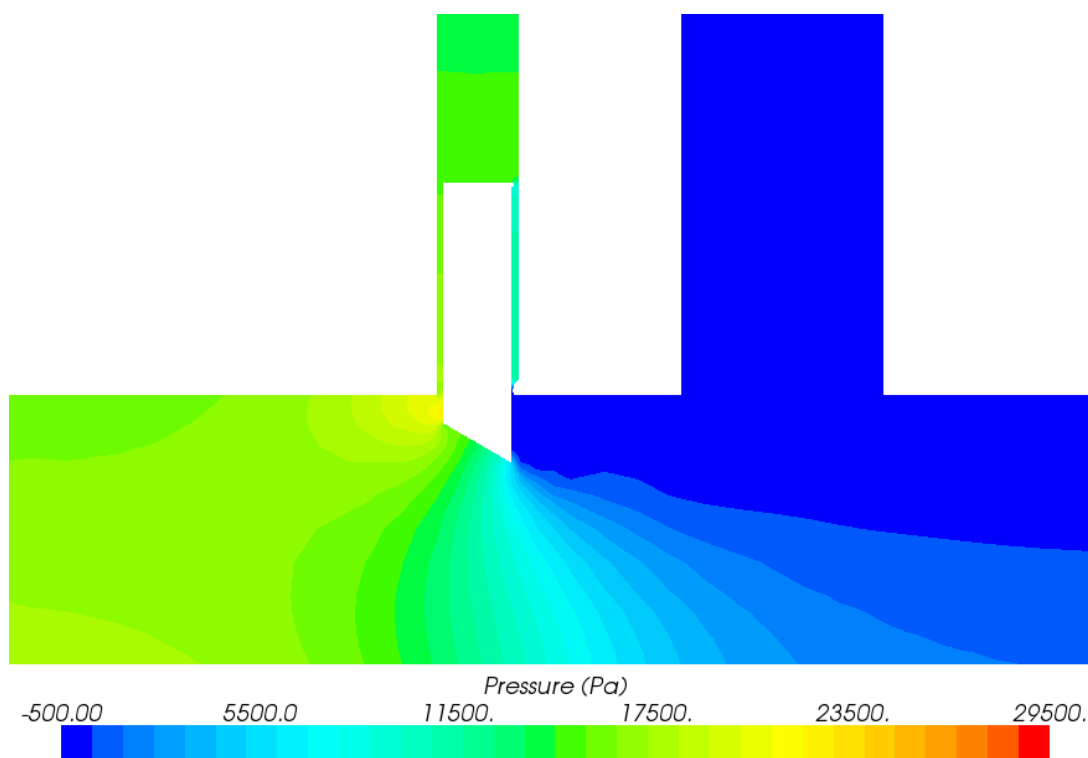
Pressão para a abertura de 50%



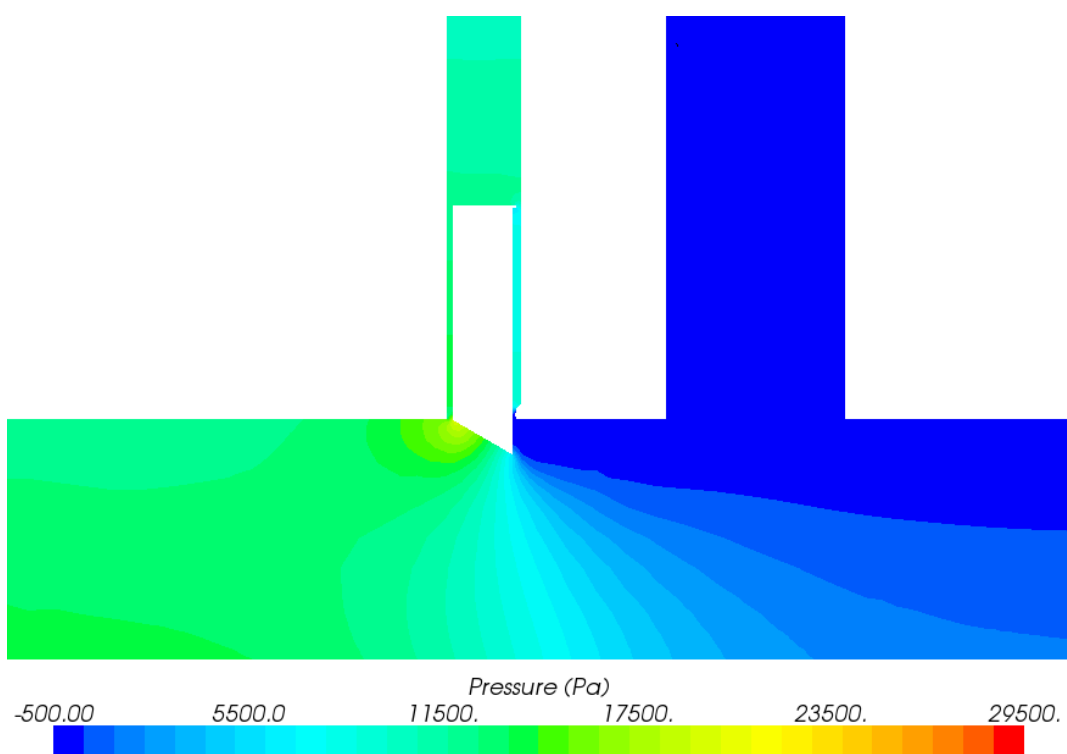
Pressão para a abertura de 55%



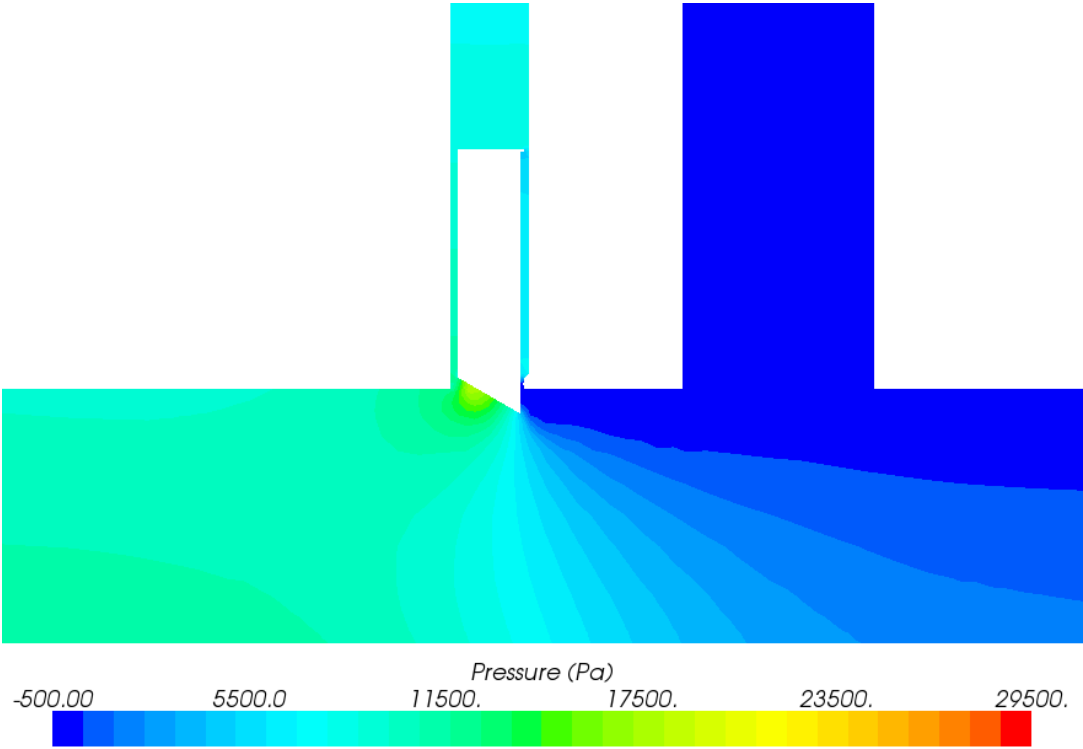
Pressão para a abertura de 65%



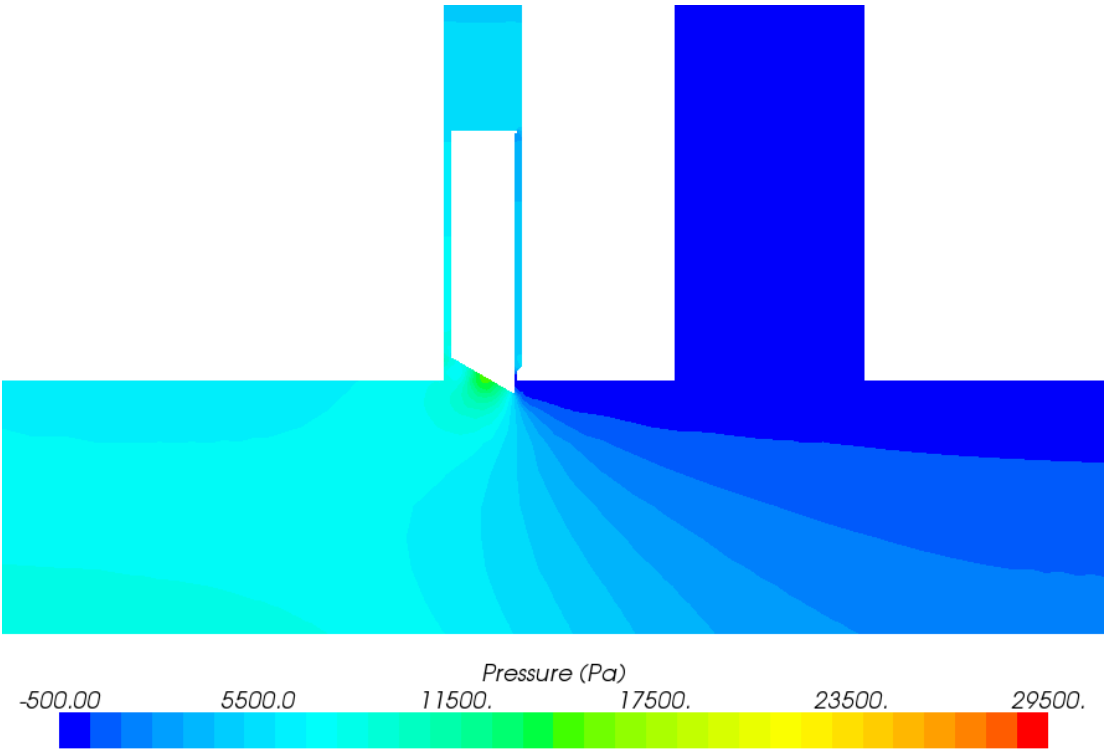
Pressão para a abertura de 75%



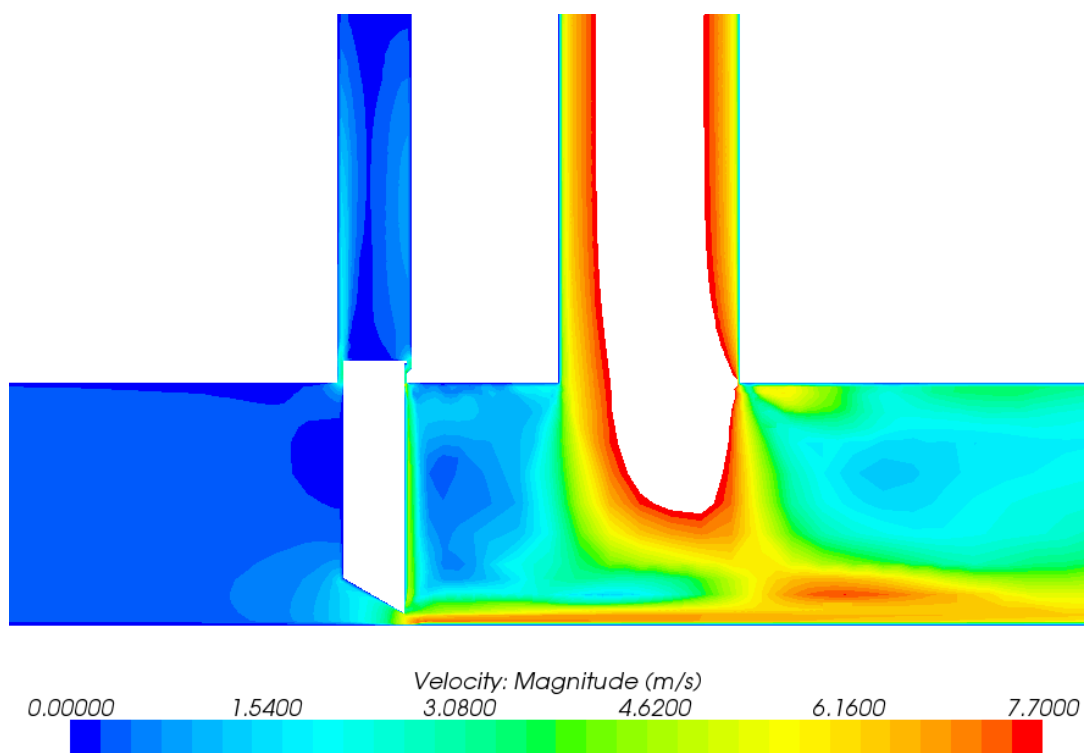
Pressão para a abertura de 85%



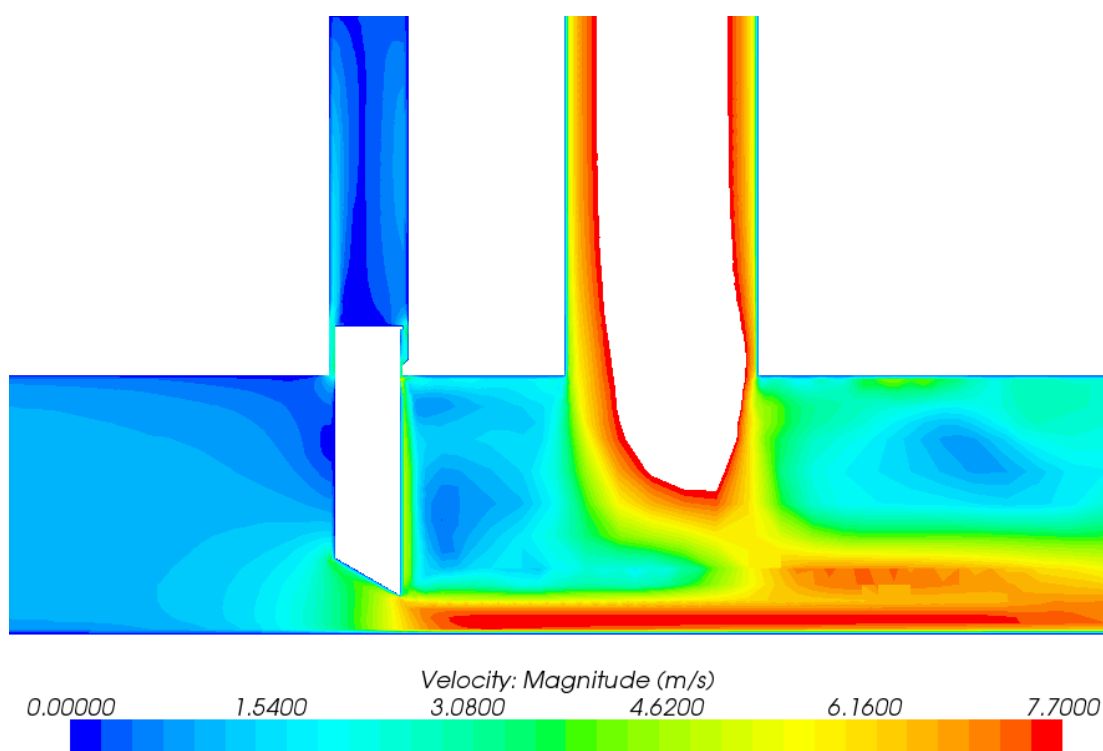
Pressão para a abertura de 90%



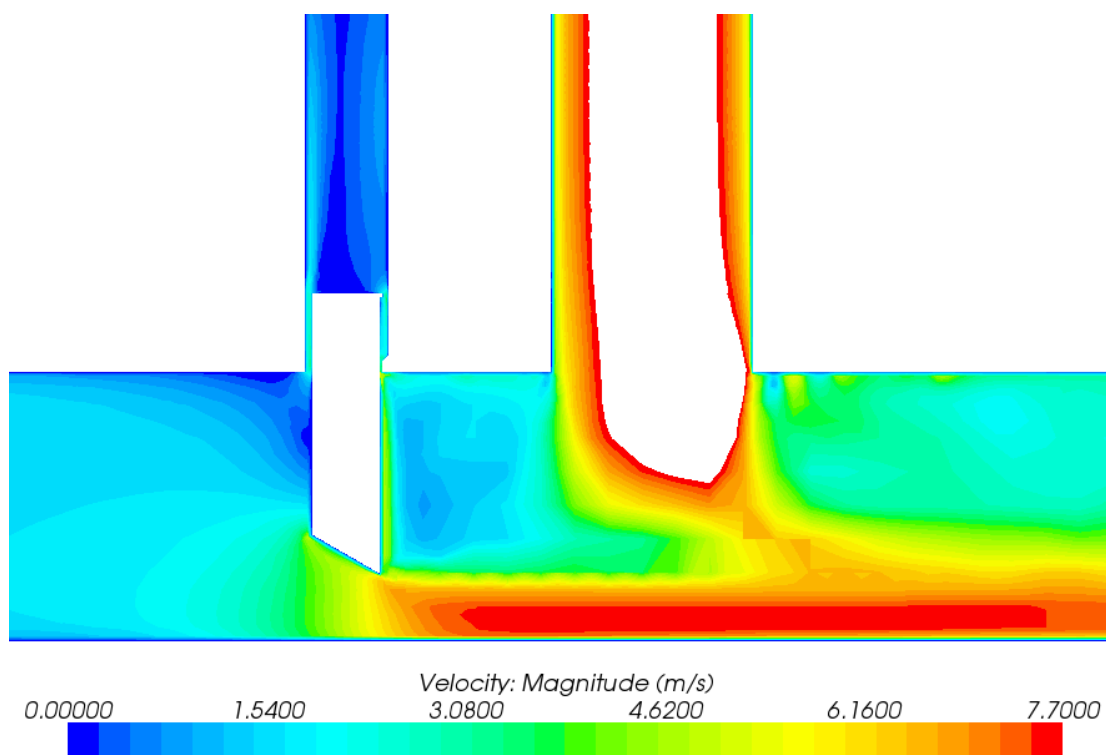
Pressão para a abertura de 95%



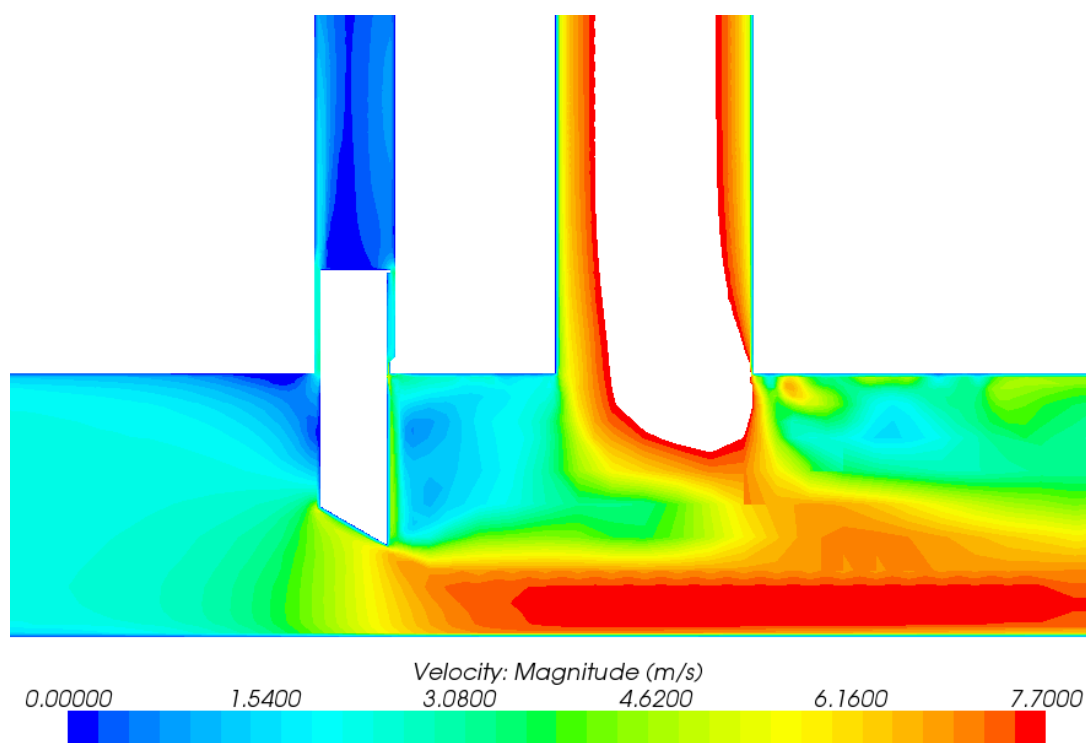
Velocidade para a abertura de 5%



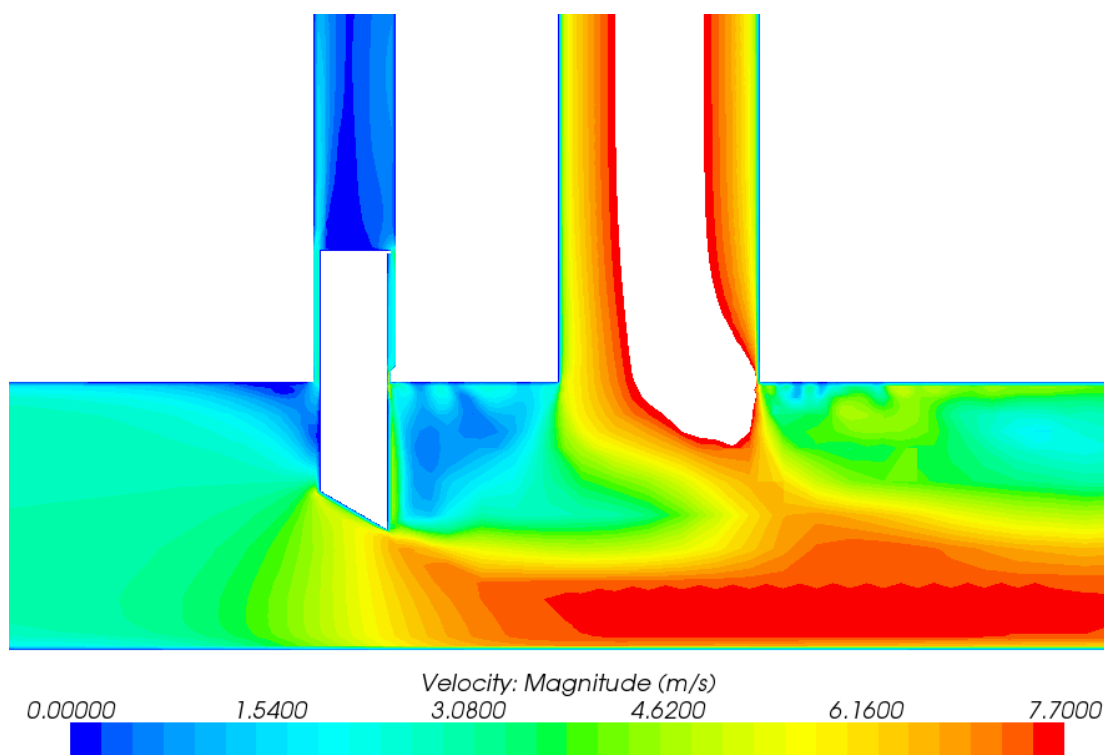
Velocidade para a abertura de 15%



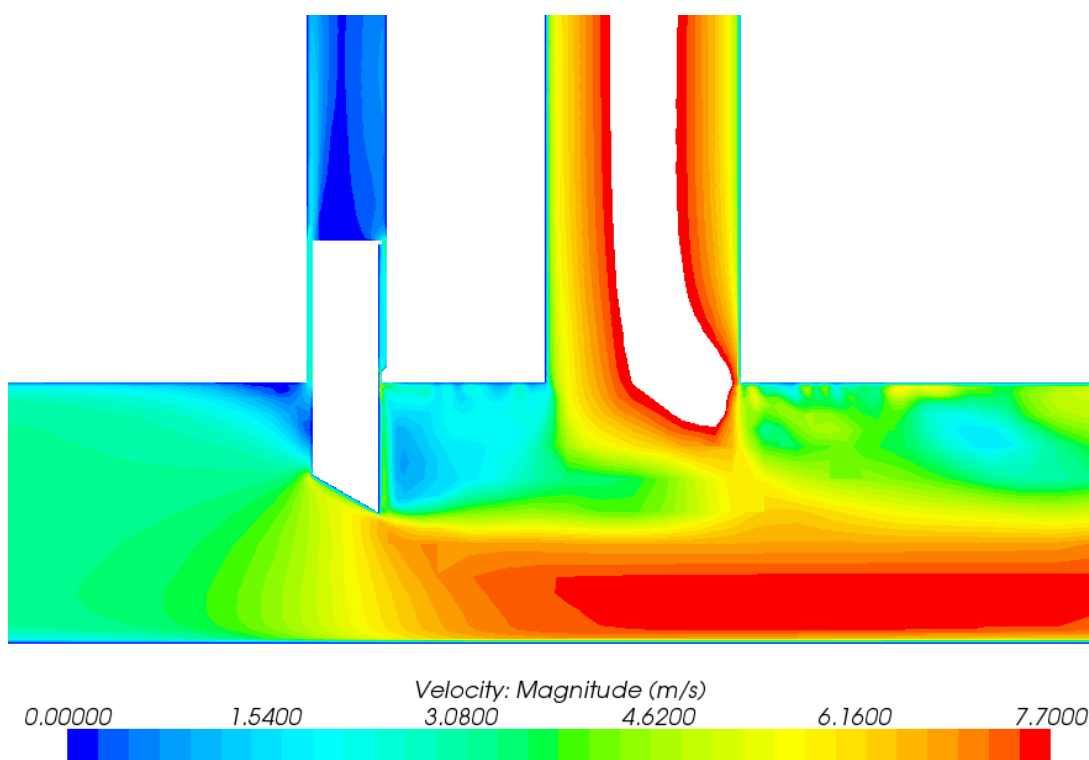
Velocidade para a abertura de 25%



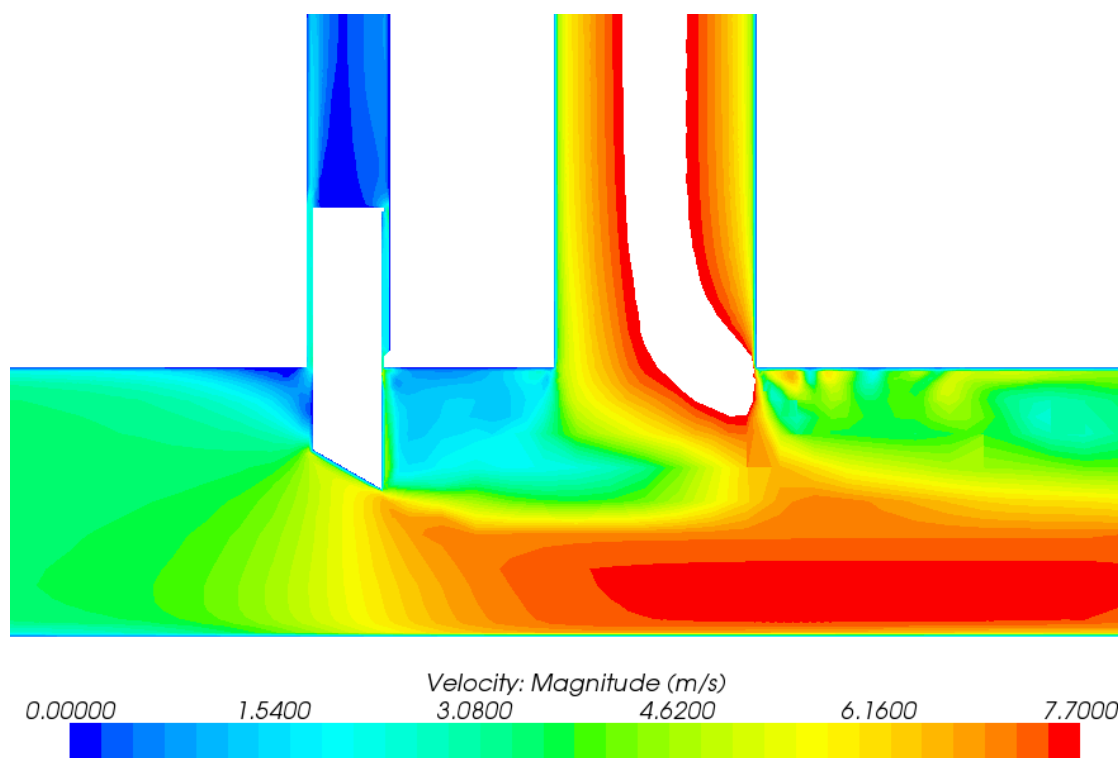
Velocidade para a abertura de 35%



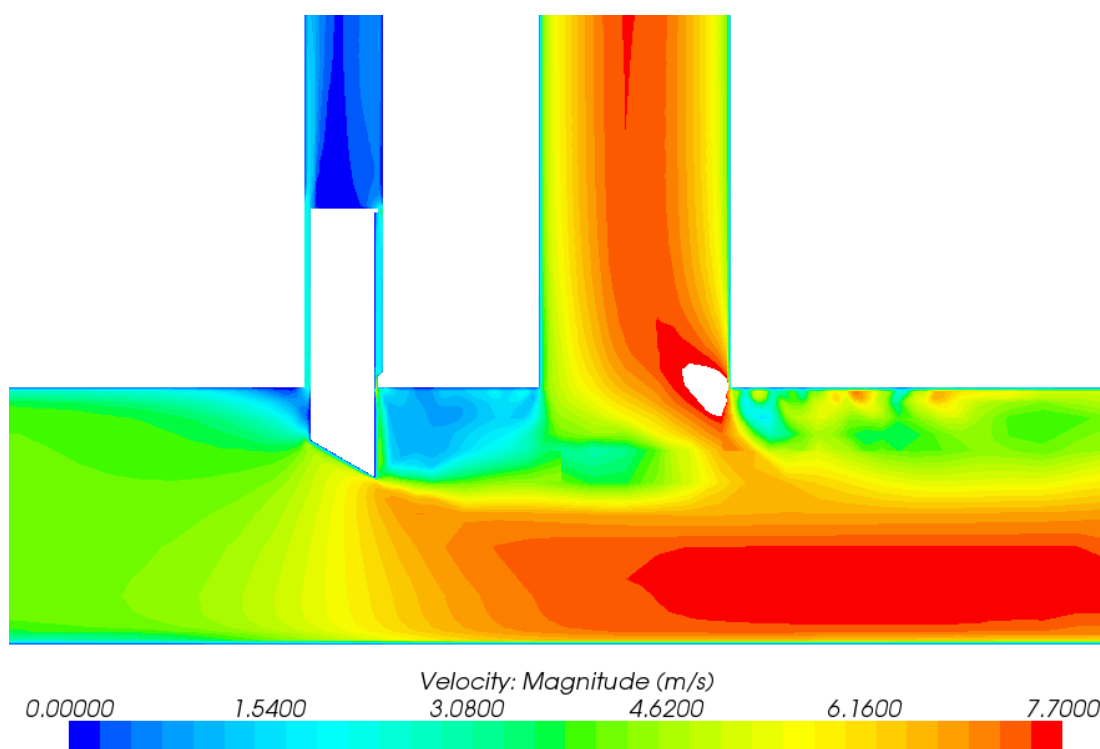
Velocidade para a abertura de 45%



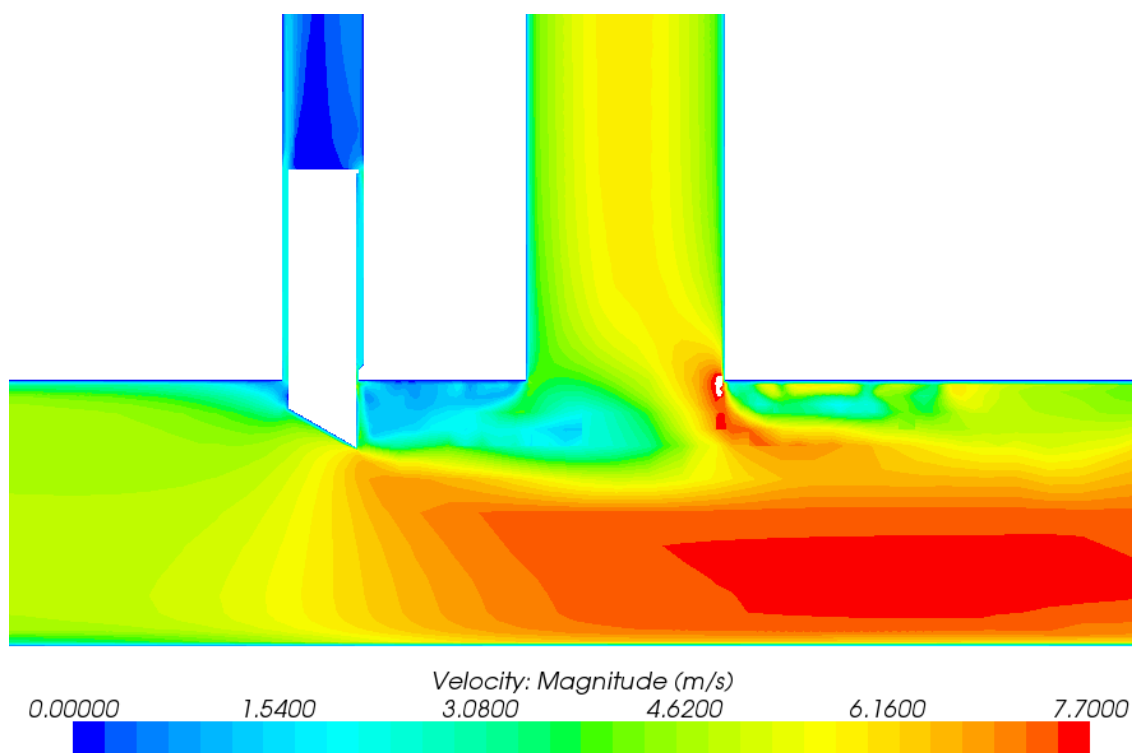
Velocidade para a abertura de 50%



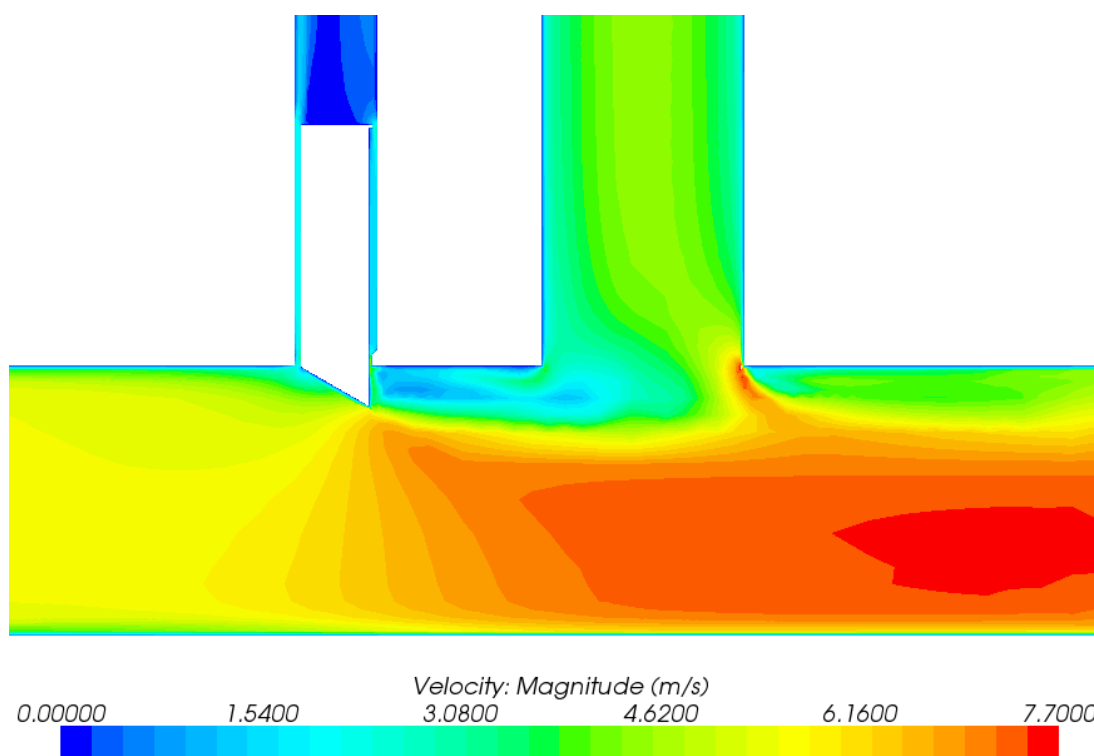
Velocidade para a abertura de 55%



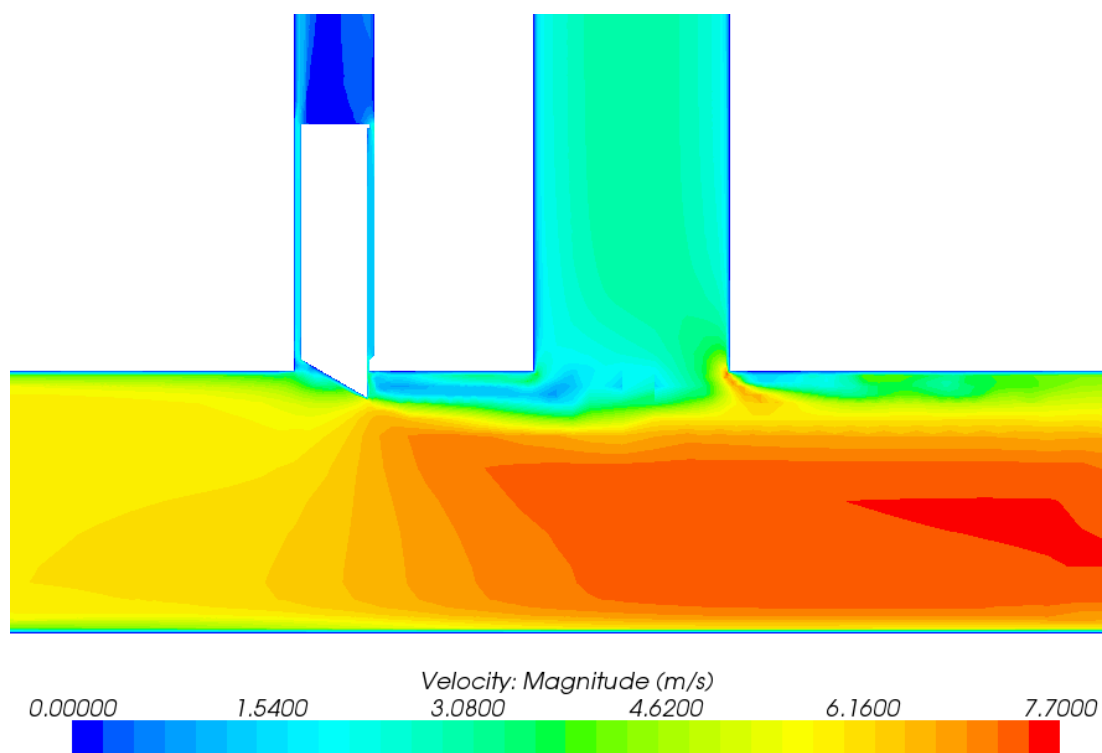
Velocidade para a abertura de 65%



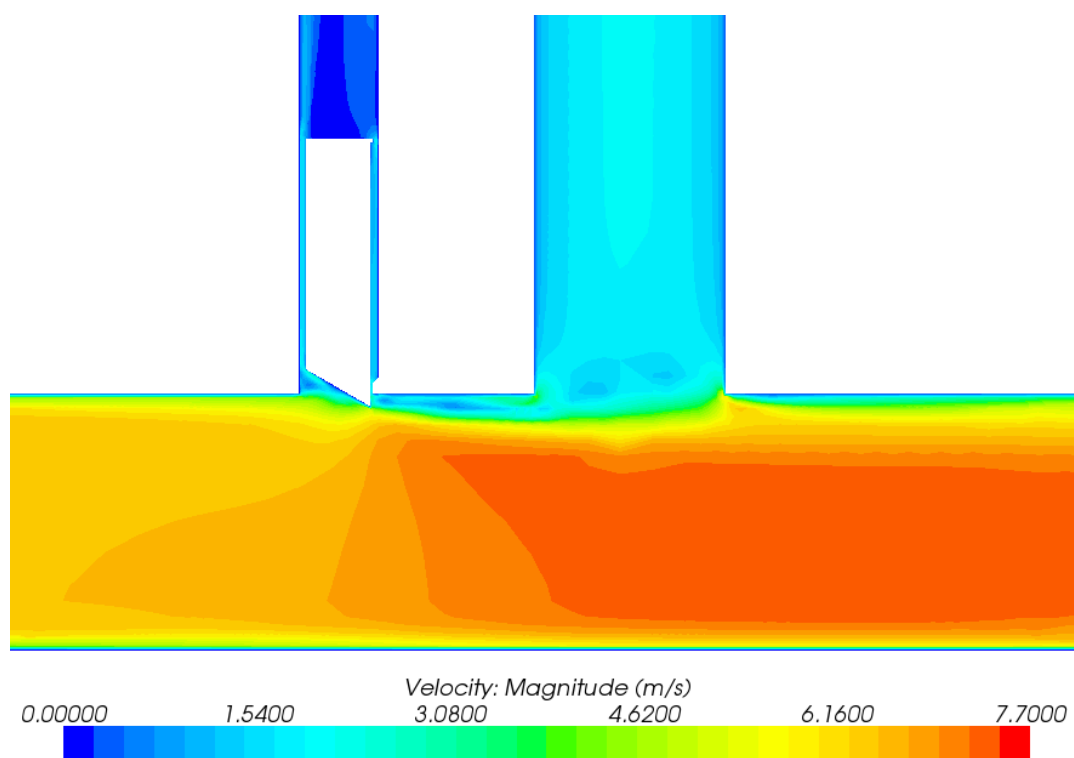
Velocidade para a abertura de 75%



Velocidade para a abertura de 85%

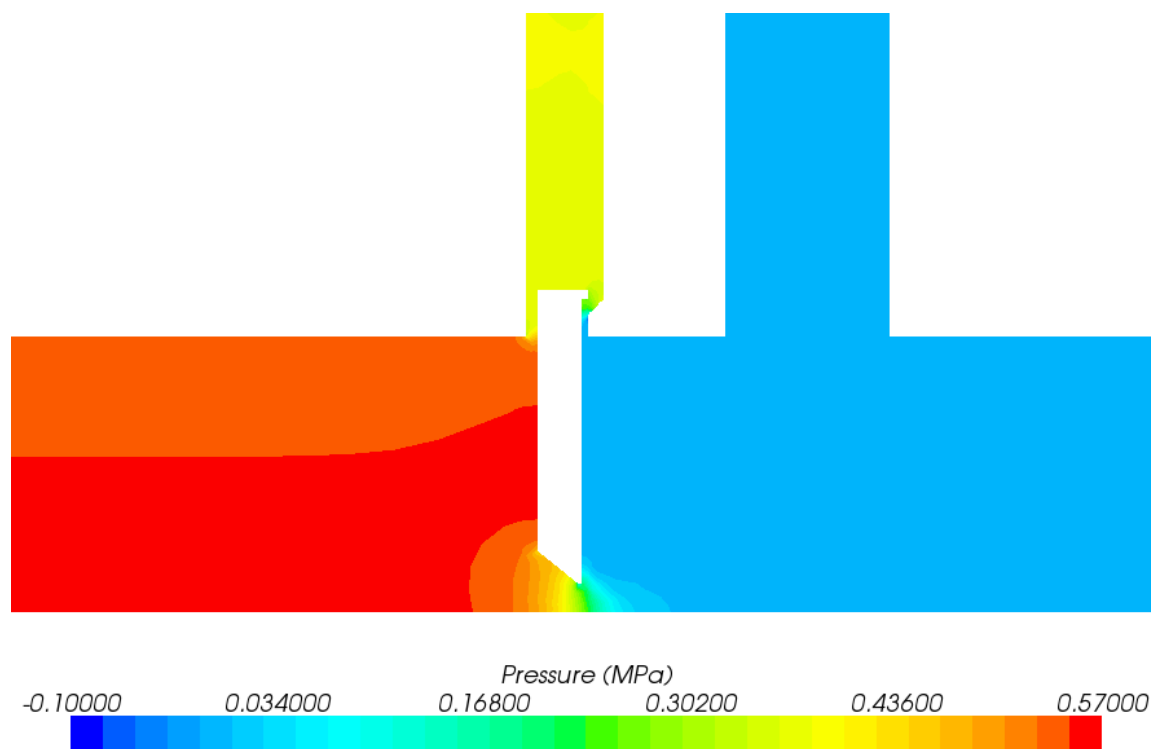


Velocidade para a abertura de 90%

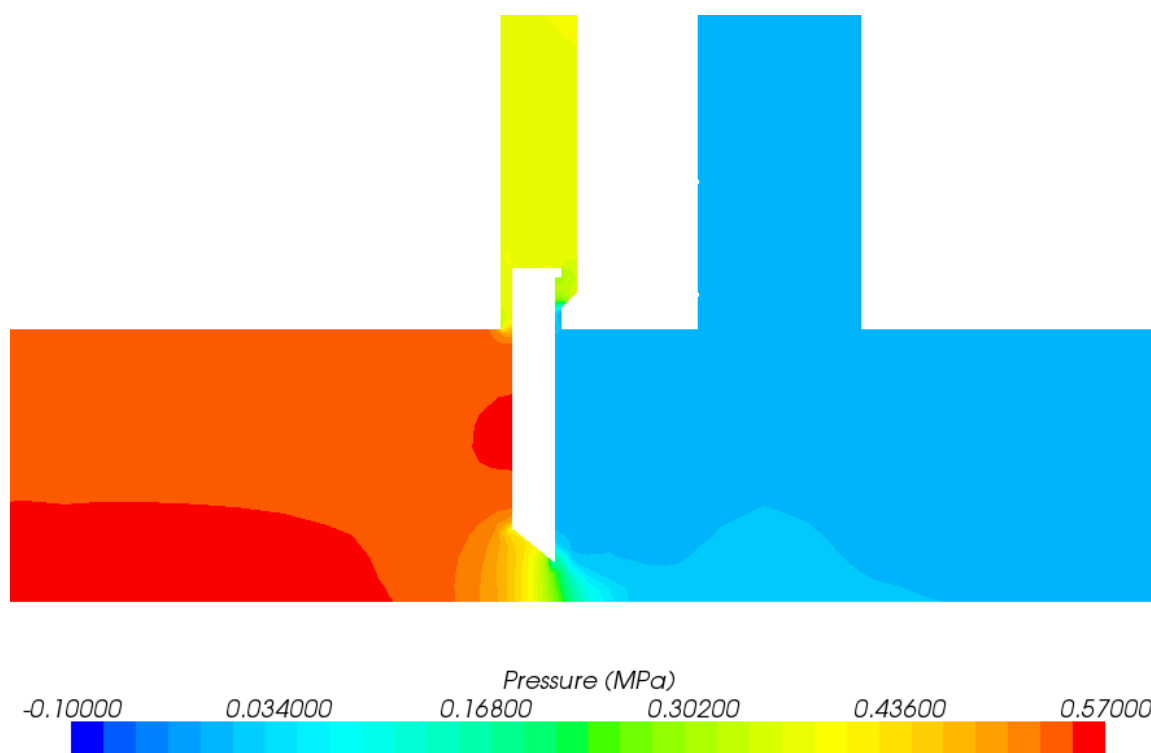


Velocidade para a abertura de 95%

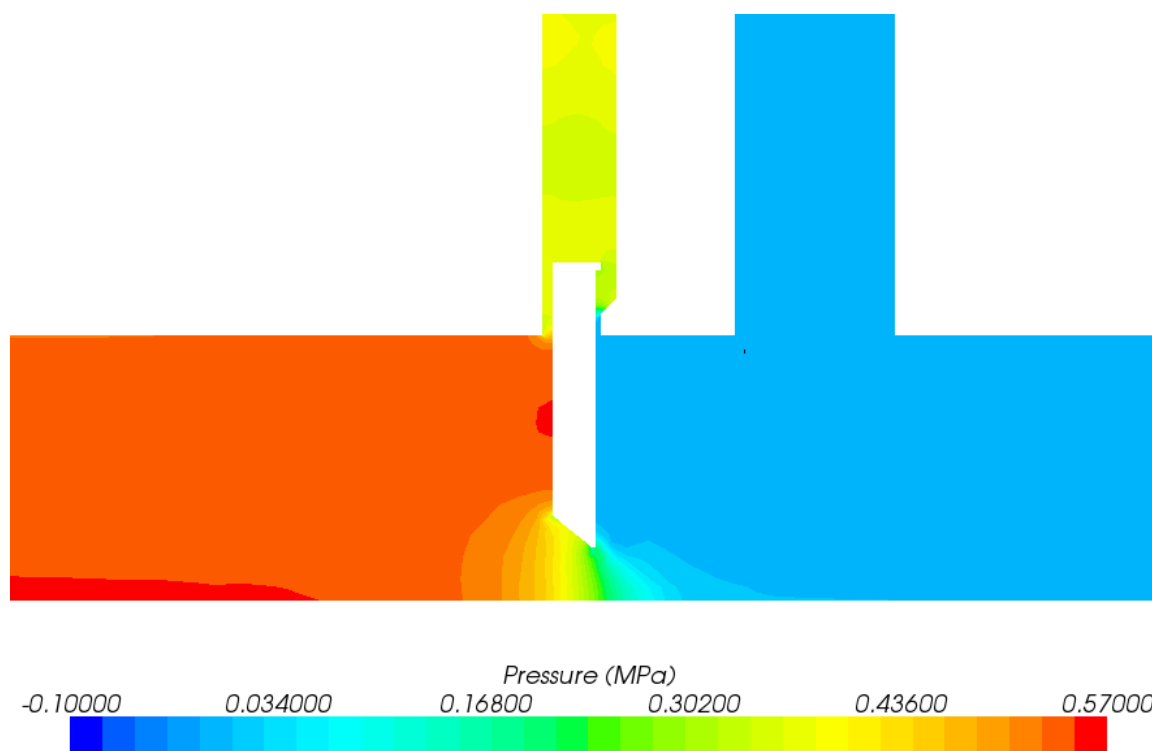
Anexo 4 – Resultados obtidos pelo modelo em CFD para a comporta real com geometria simplificada



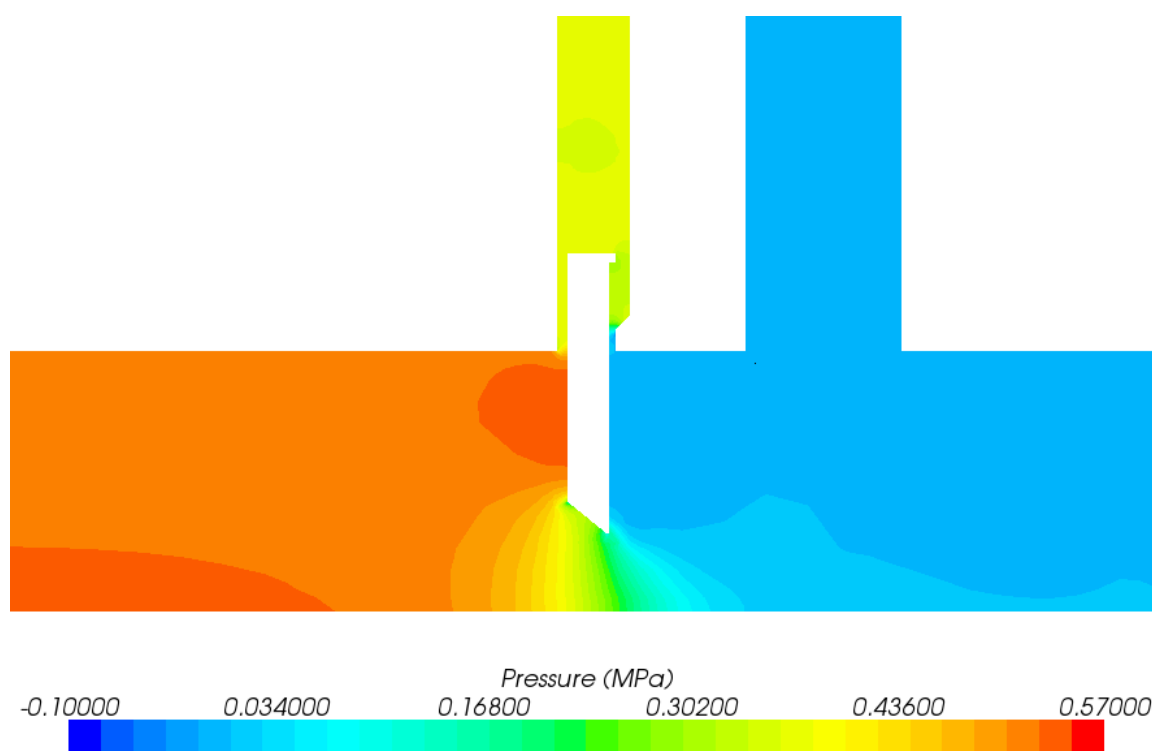
Pressão para a abertura de 10%



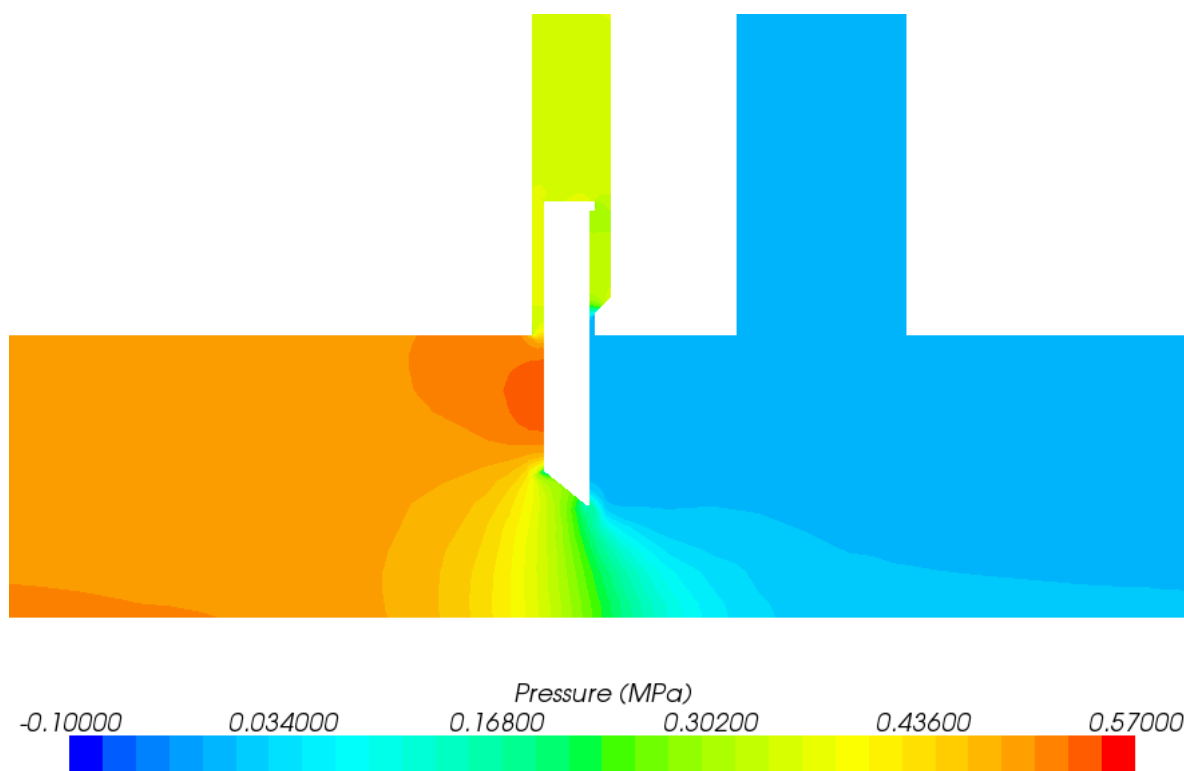
Pressão para a abertura de 15%



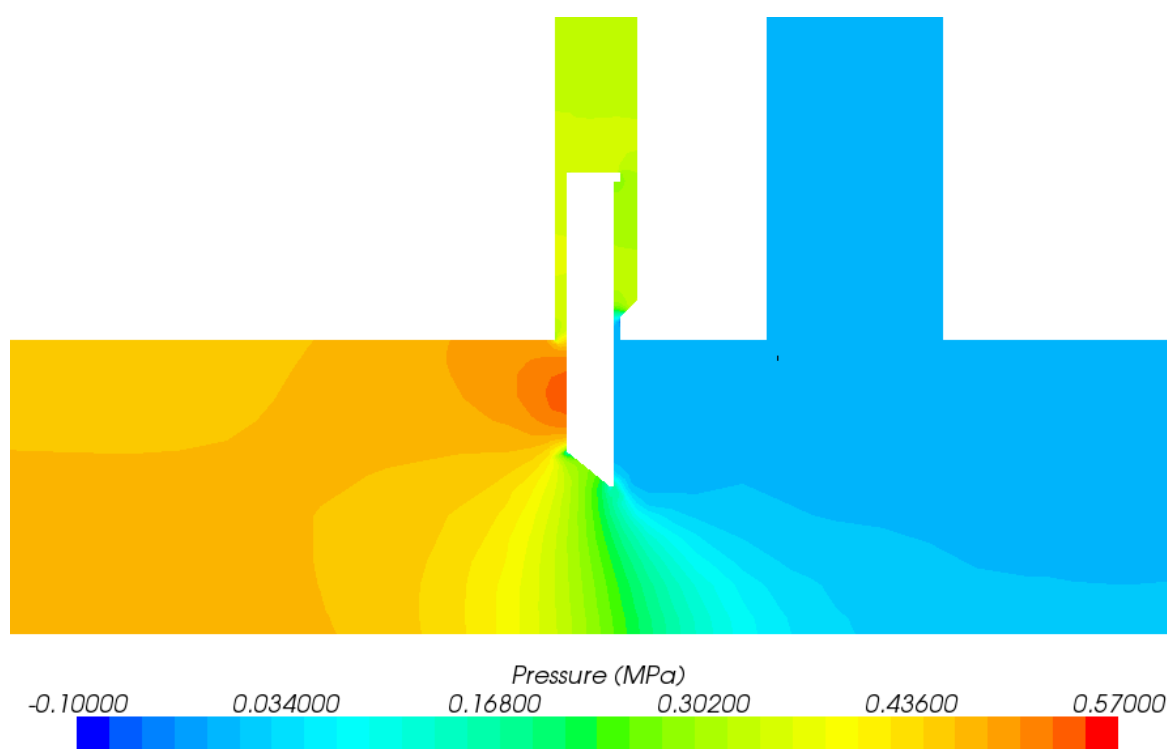
Pressão para a abertura de 20%



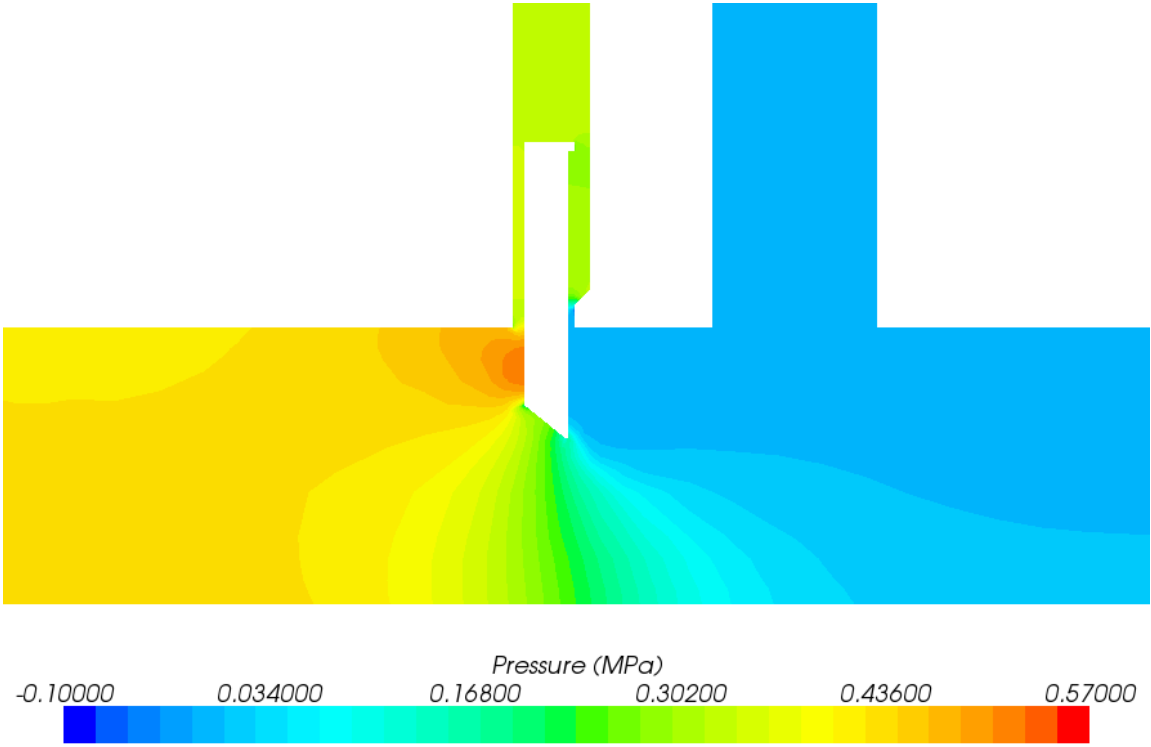
Pressão para a abertura de 30%



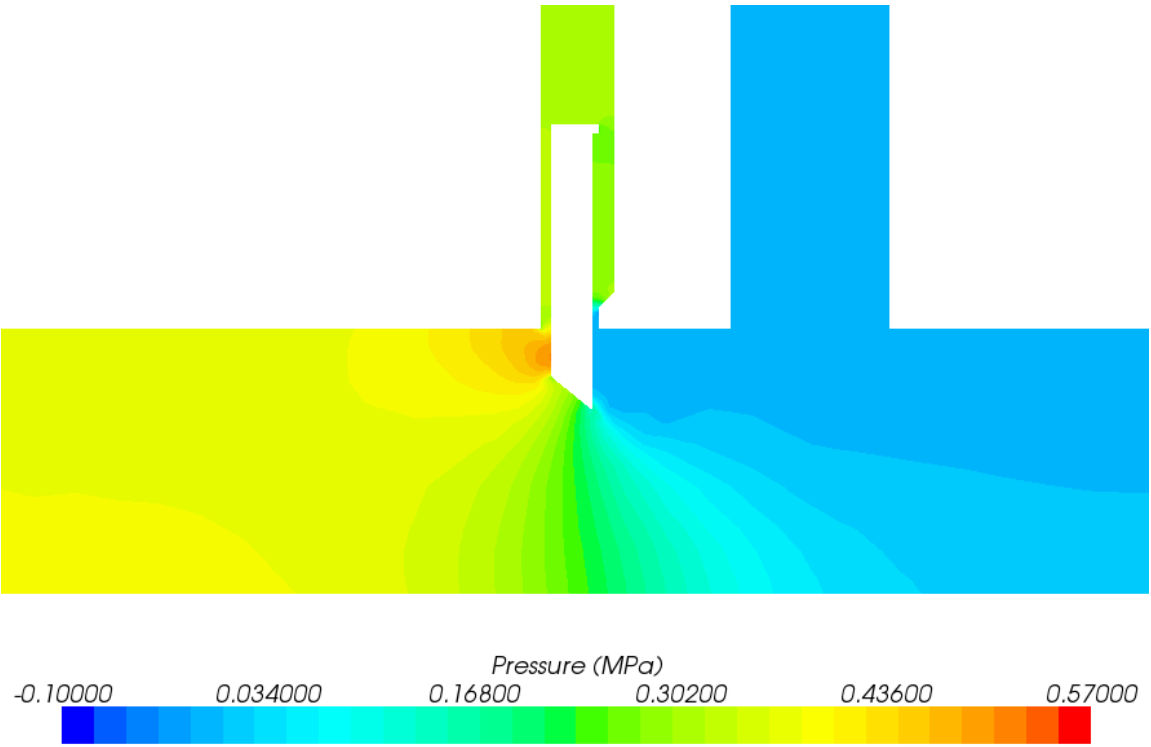
Pressão para a abertura de 40%



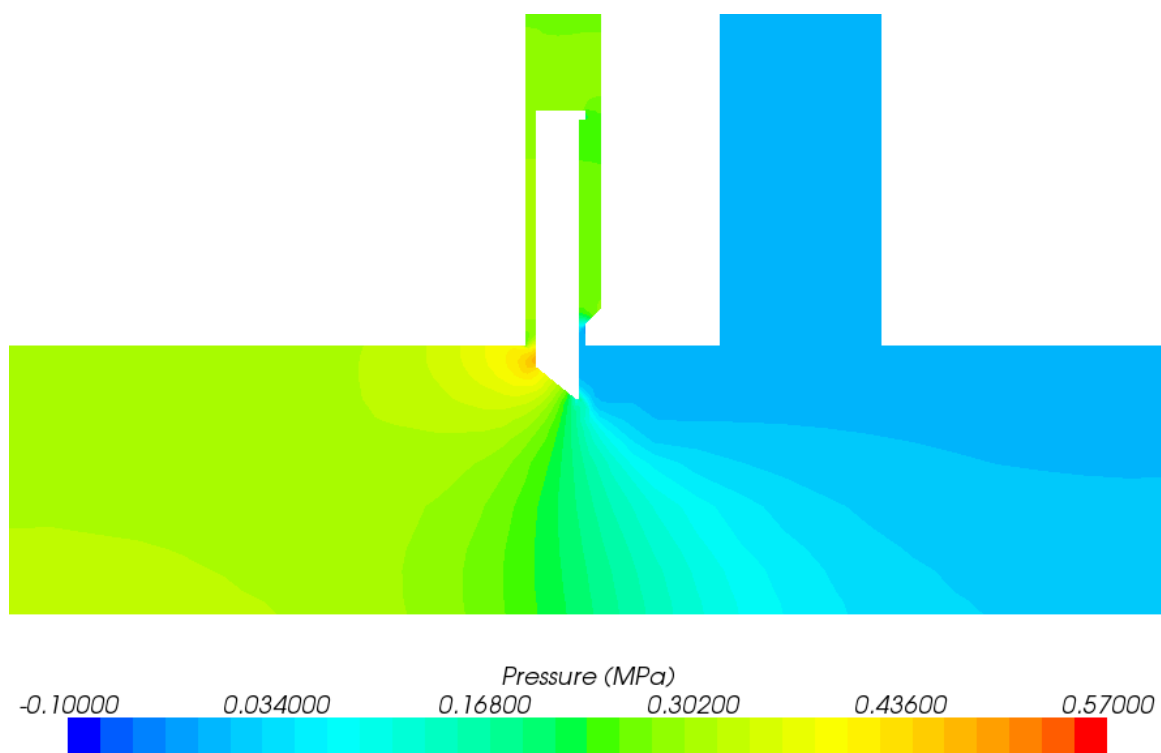
Pressão para a abertura de 50%



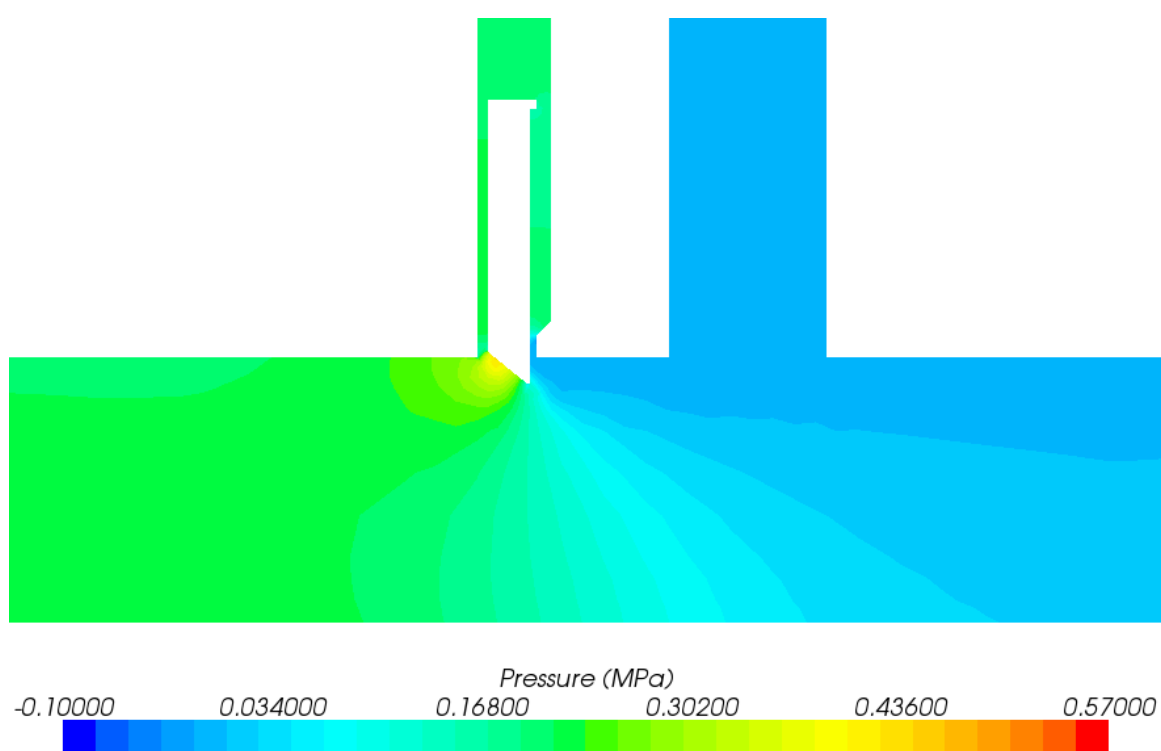
Pressão para a abertura de 60%



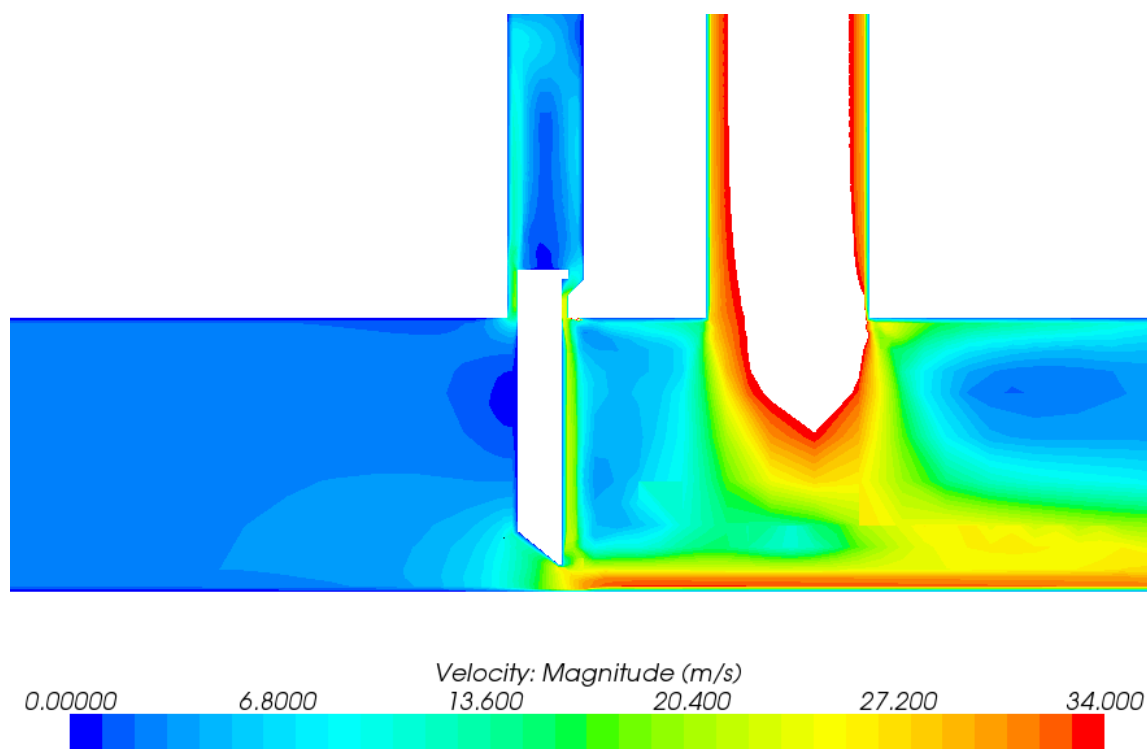
Pressão para a abertura de 70%



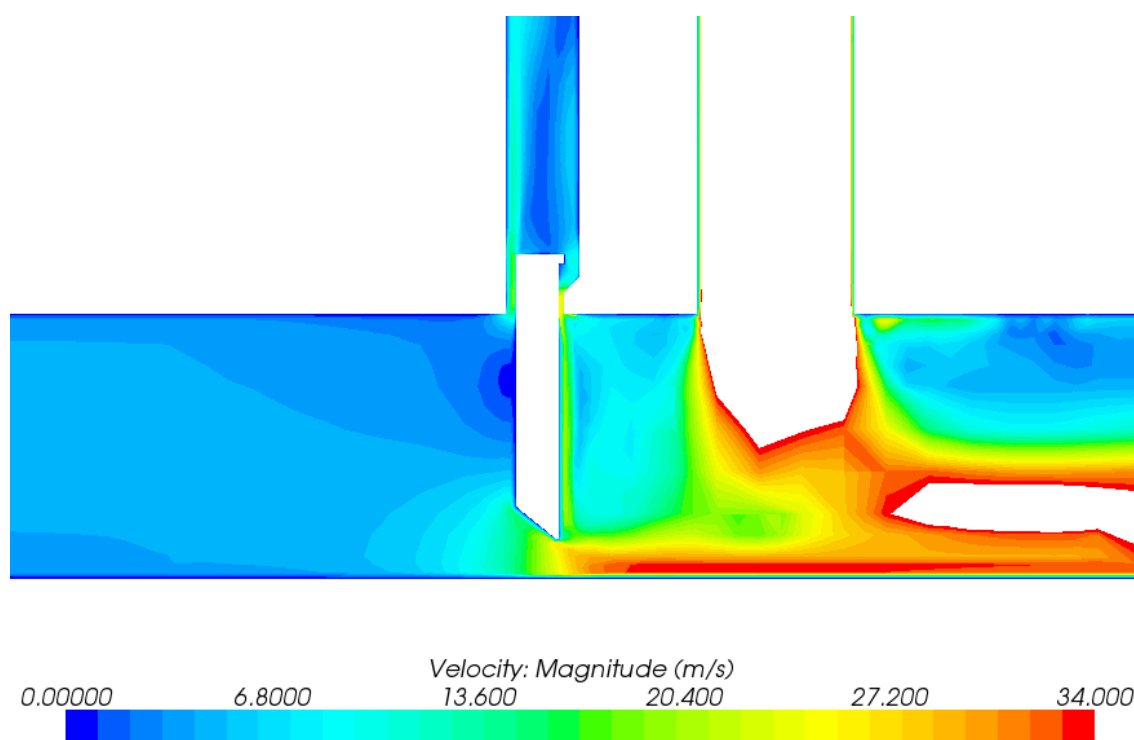
Pressão para a abertura de 80%



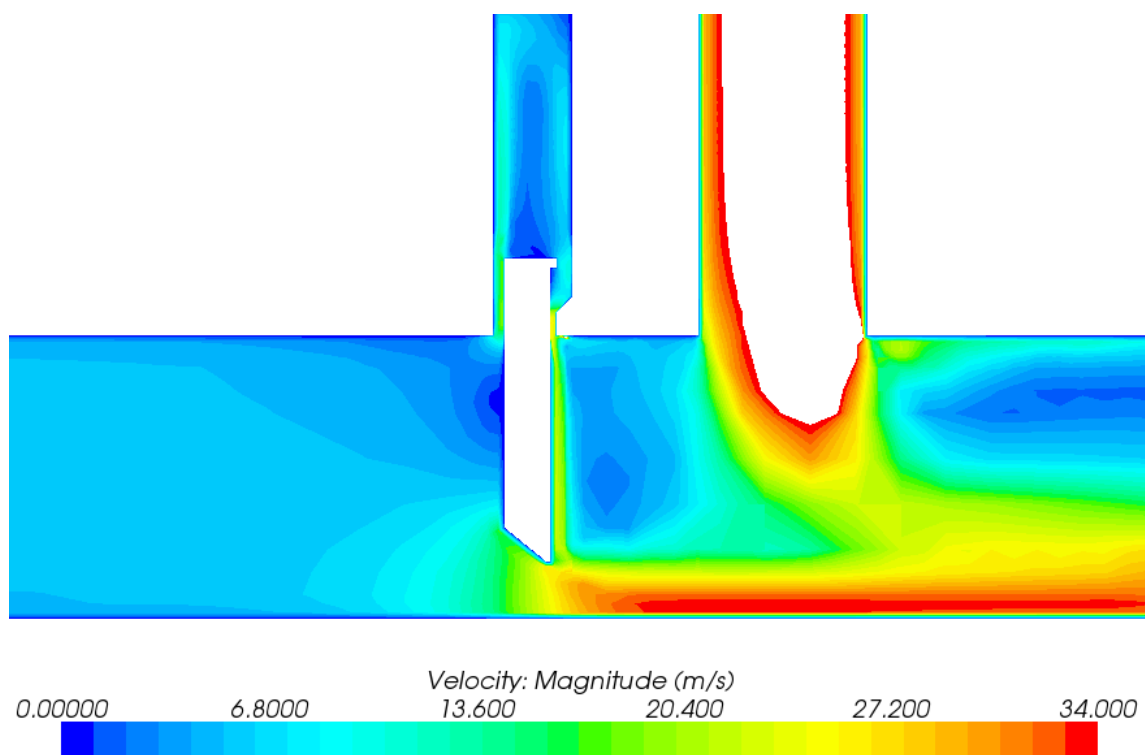
Pressão para a abertura de 90%



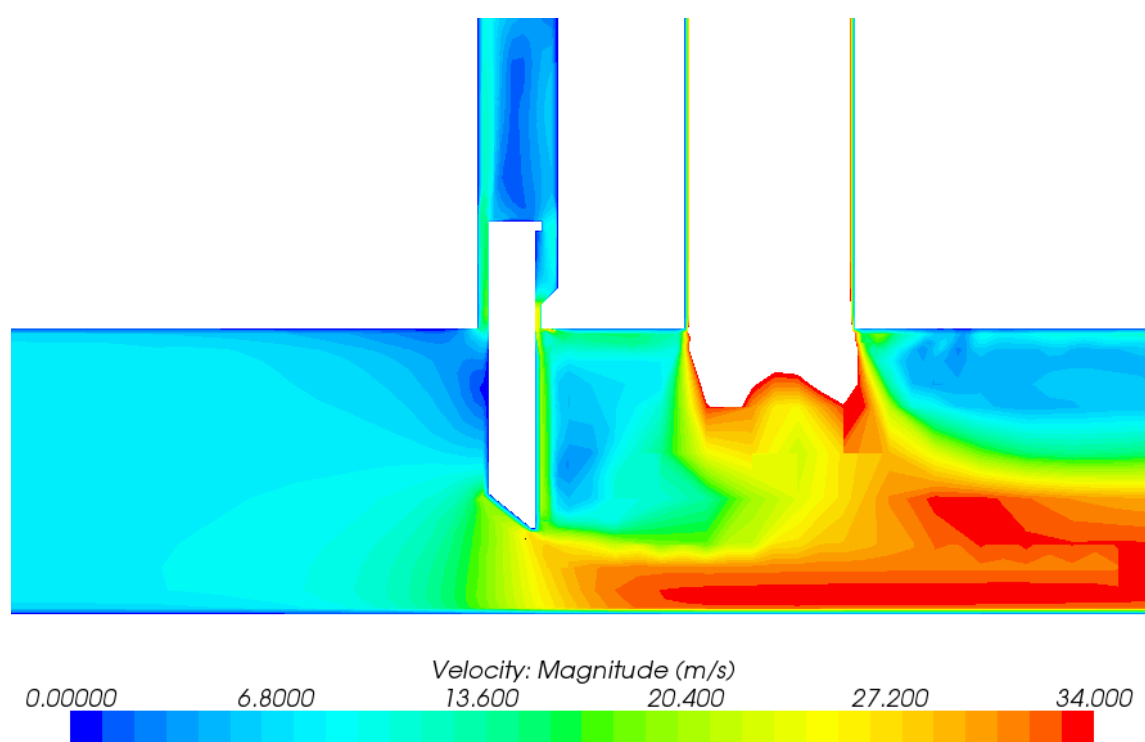
Velocidade para a abertura de 10%



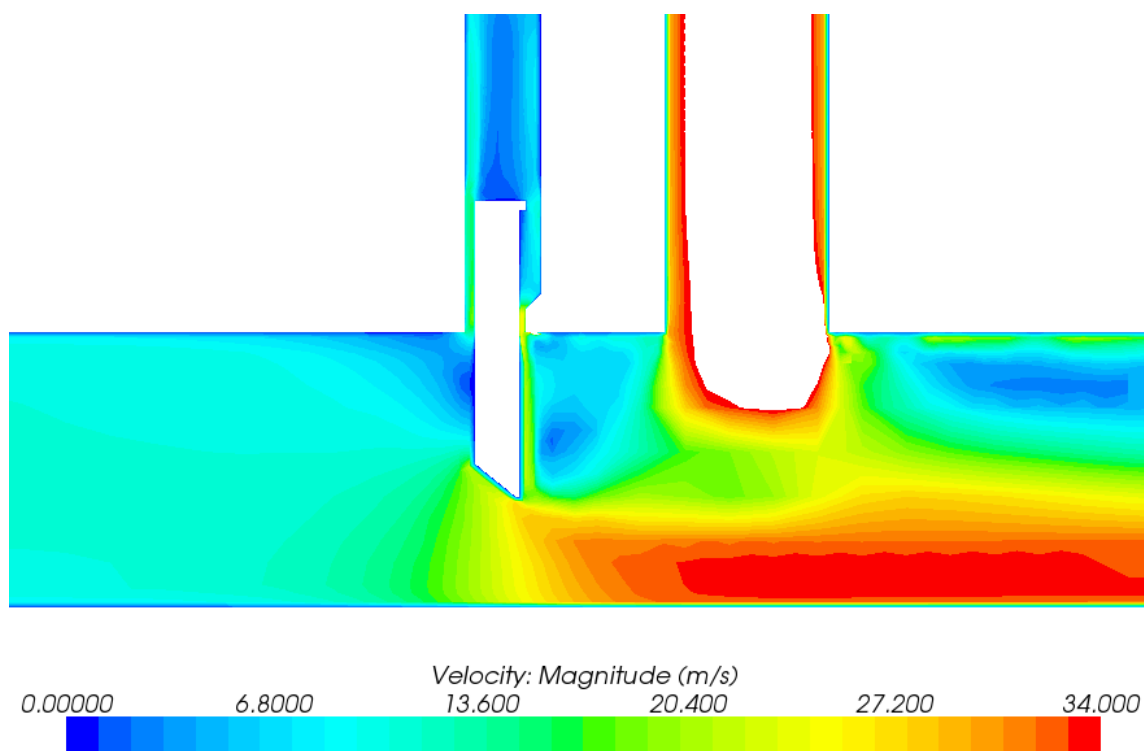
Velocidade para a abertura de 15%



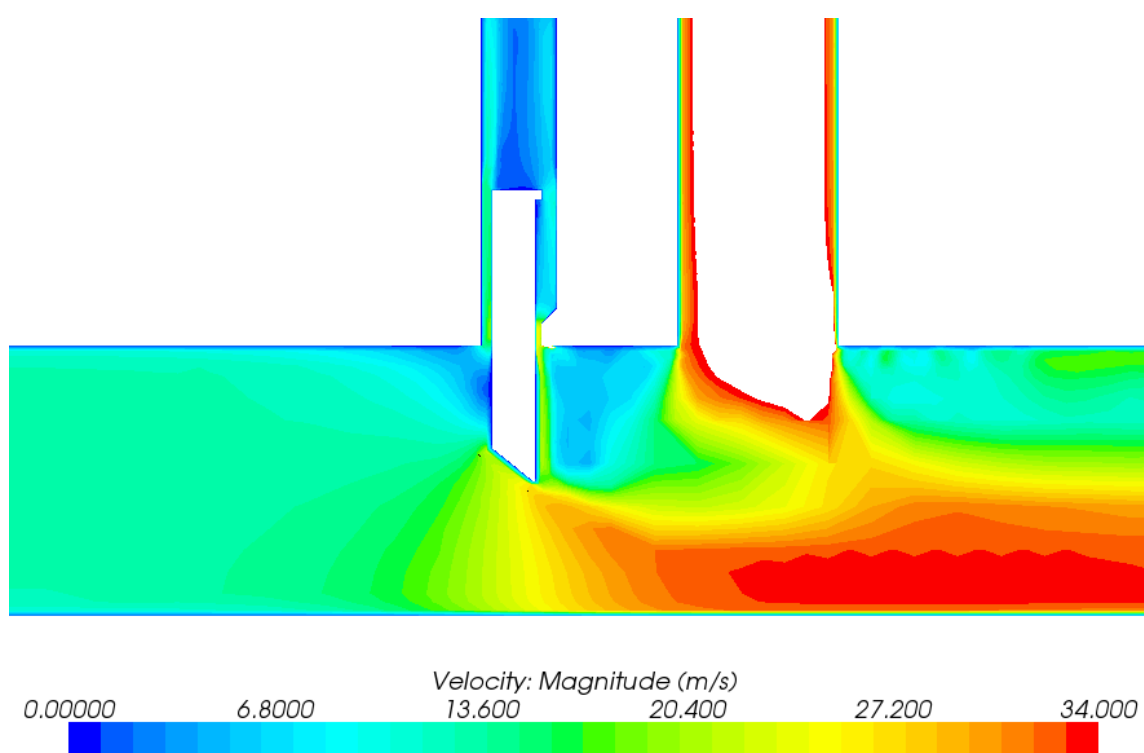
Velocidade para a abertura de 20%



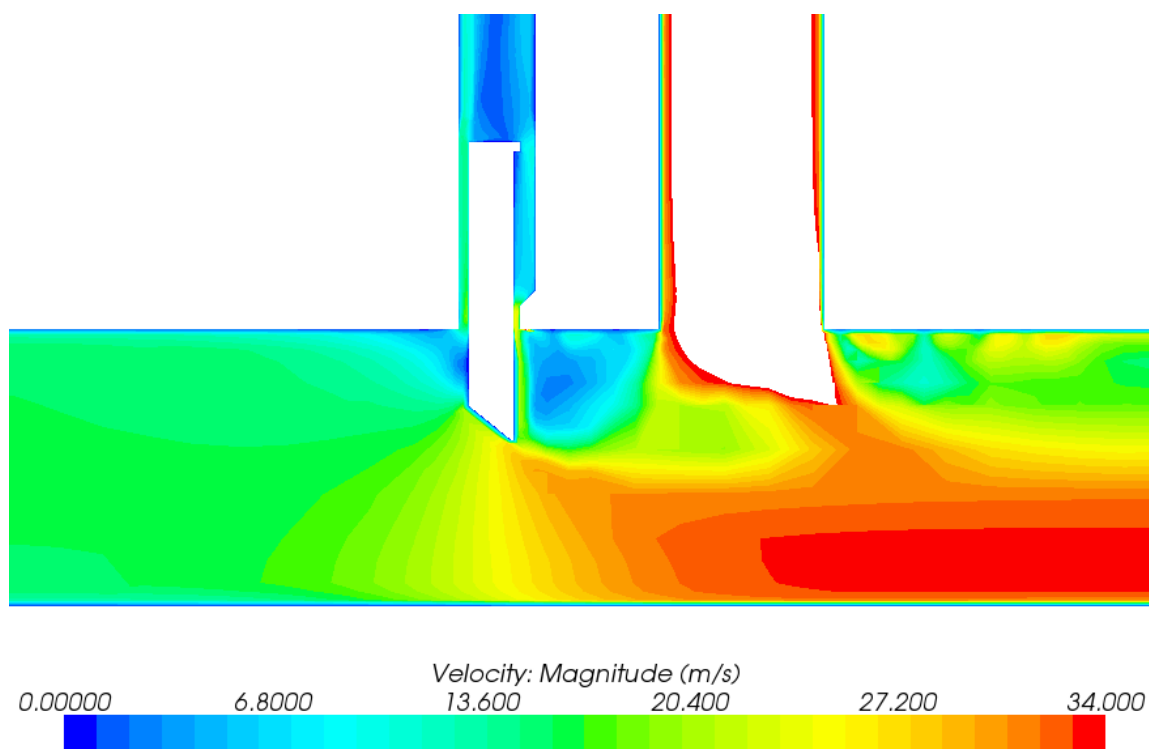
Velocidade para a abertura de 30%



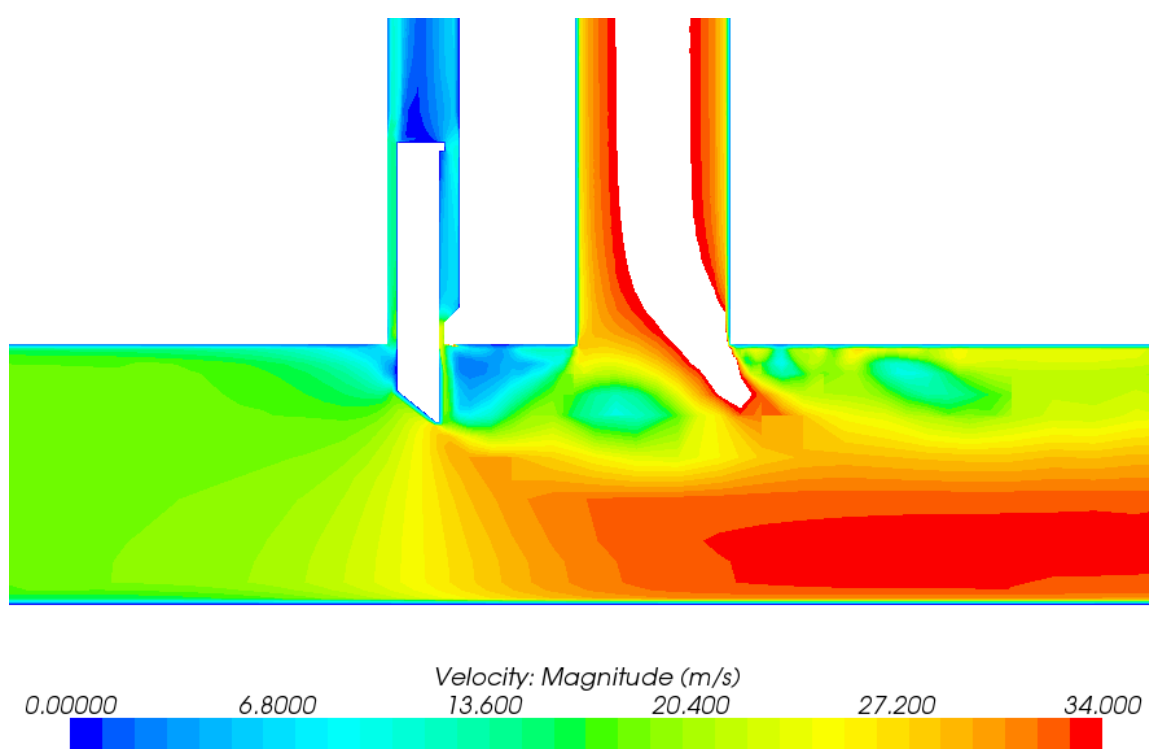
Velocidade para a abertura de 40%



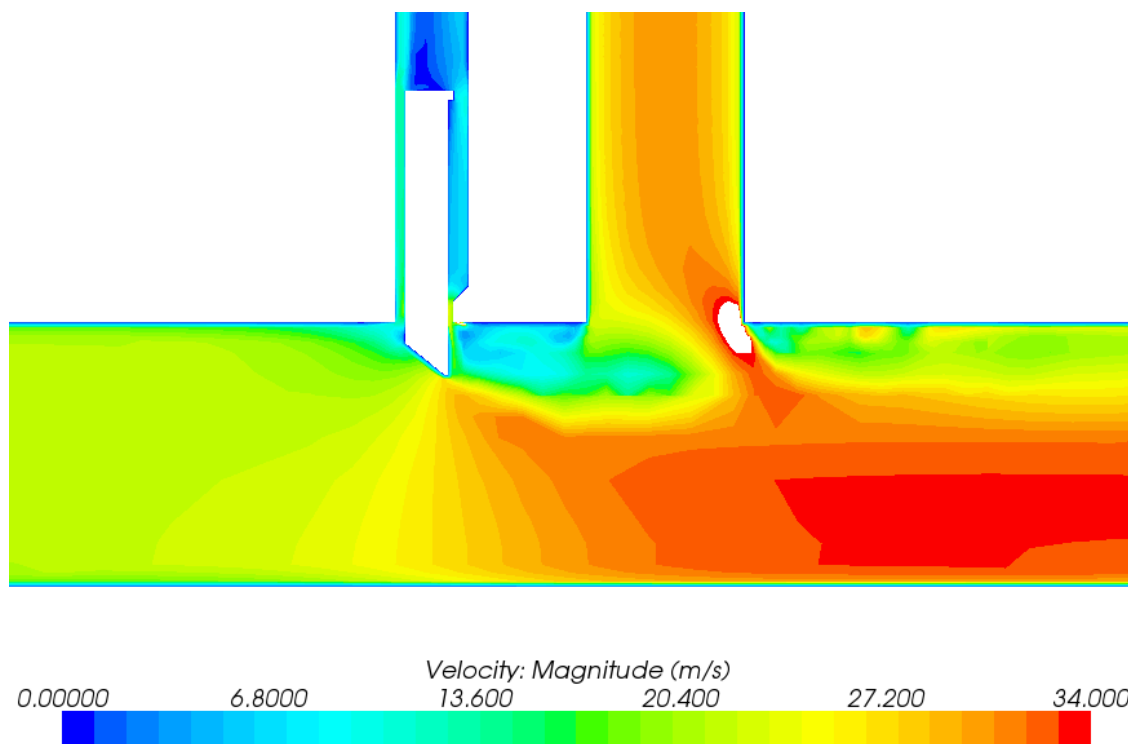
Velocidade para a abertura de 50%



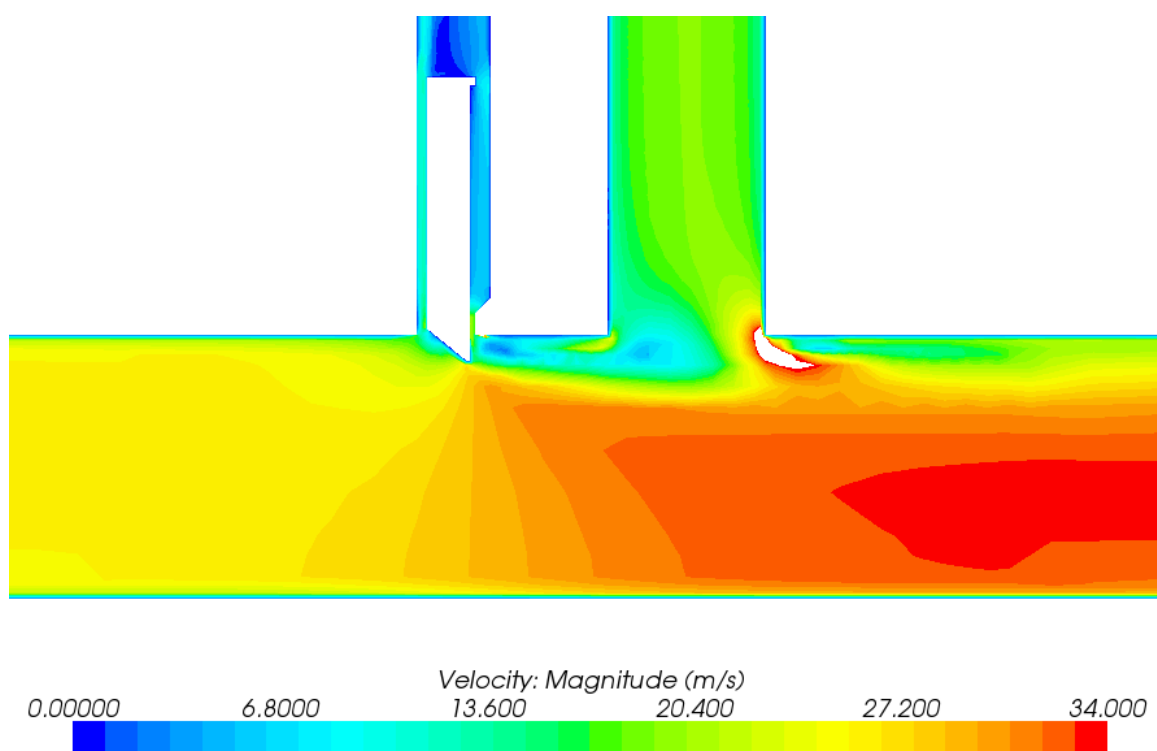
Velocidade para a abertura de 60%



Velocidade para a abertura de 70%

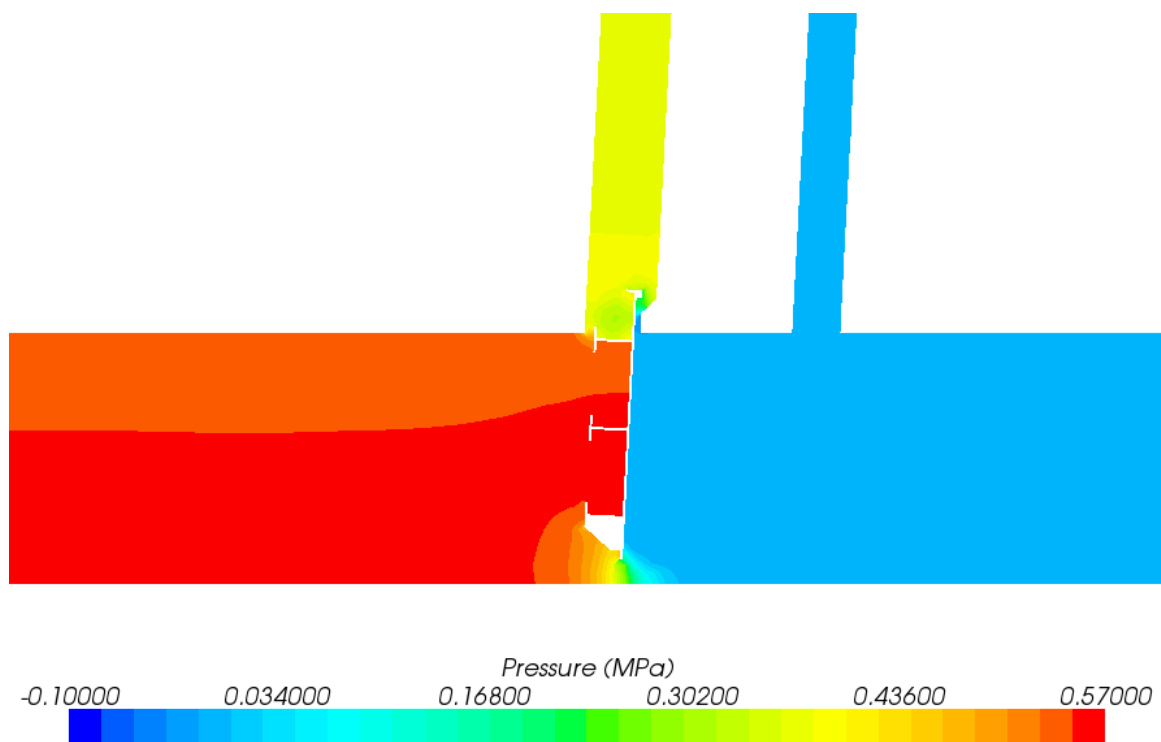


Velocidade para a abertura de 80%

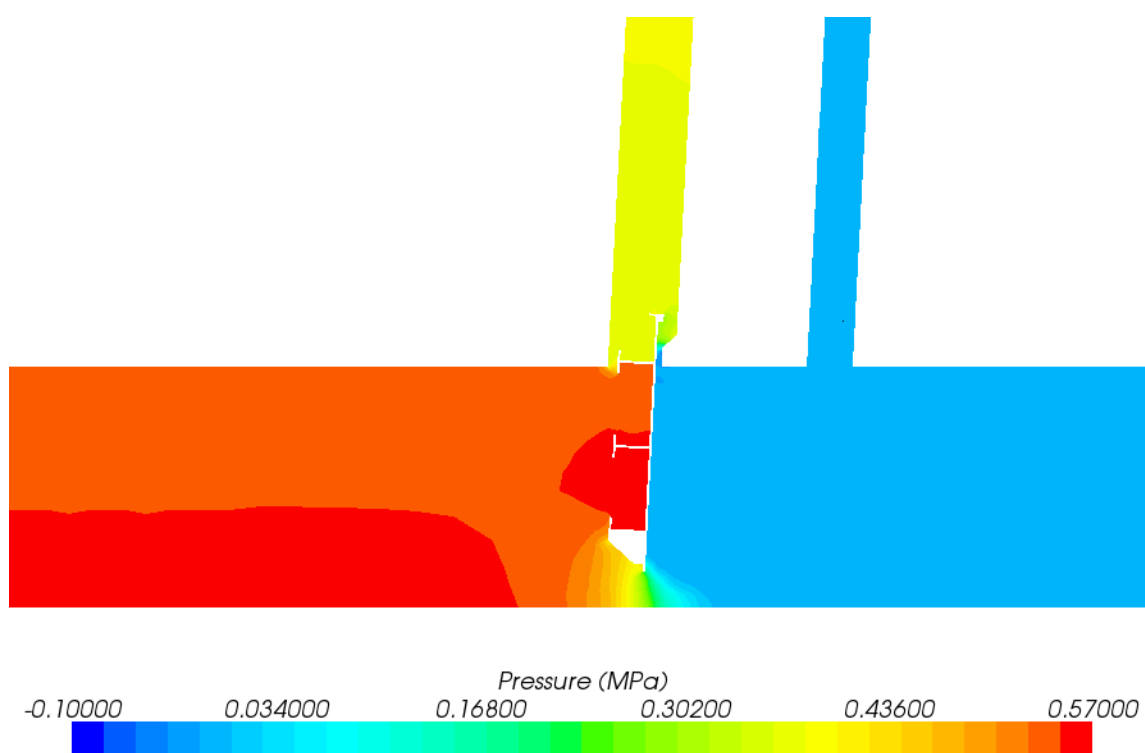


Velocidade para a abertura de 90%

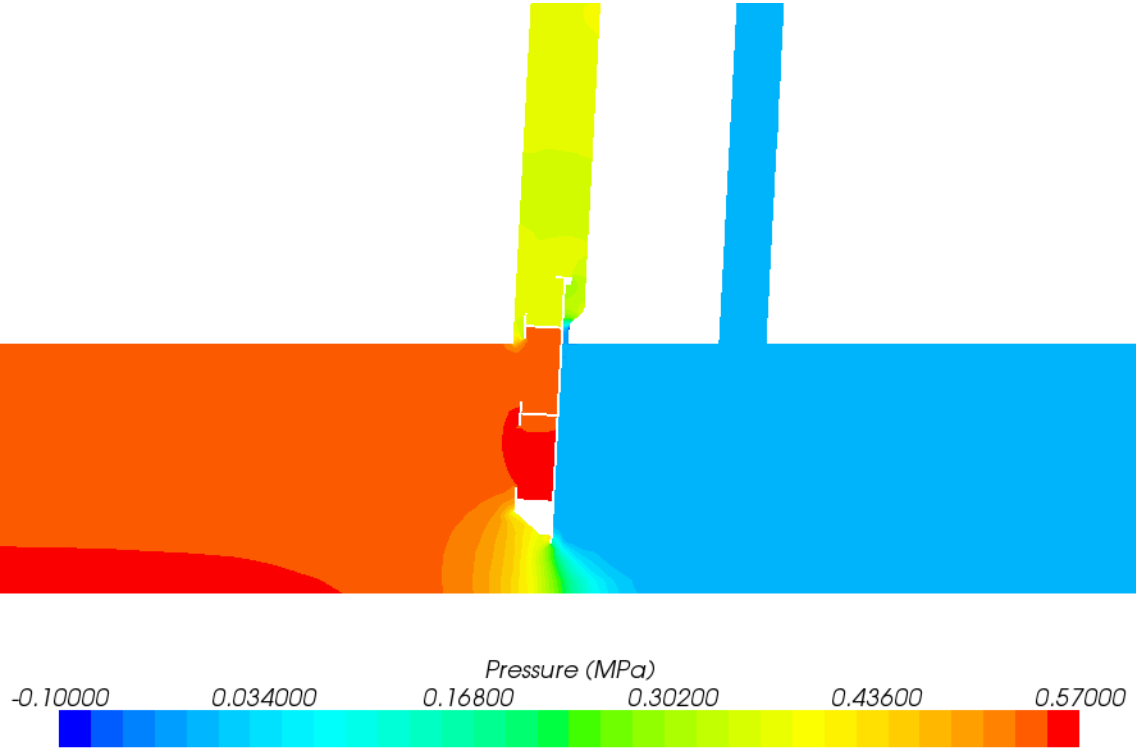
Anexo 5 – Resultados obtidos pelo modelo em CFD para a comporta real com geometria real



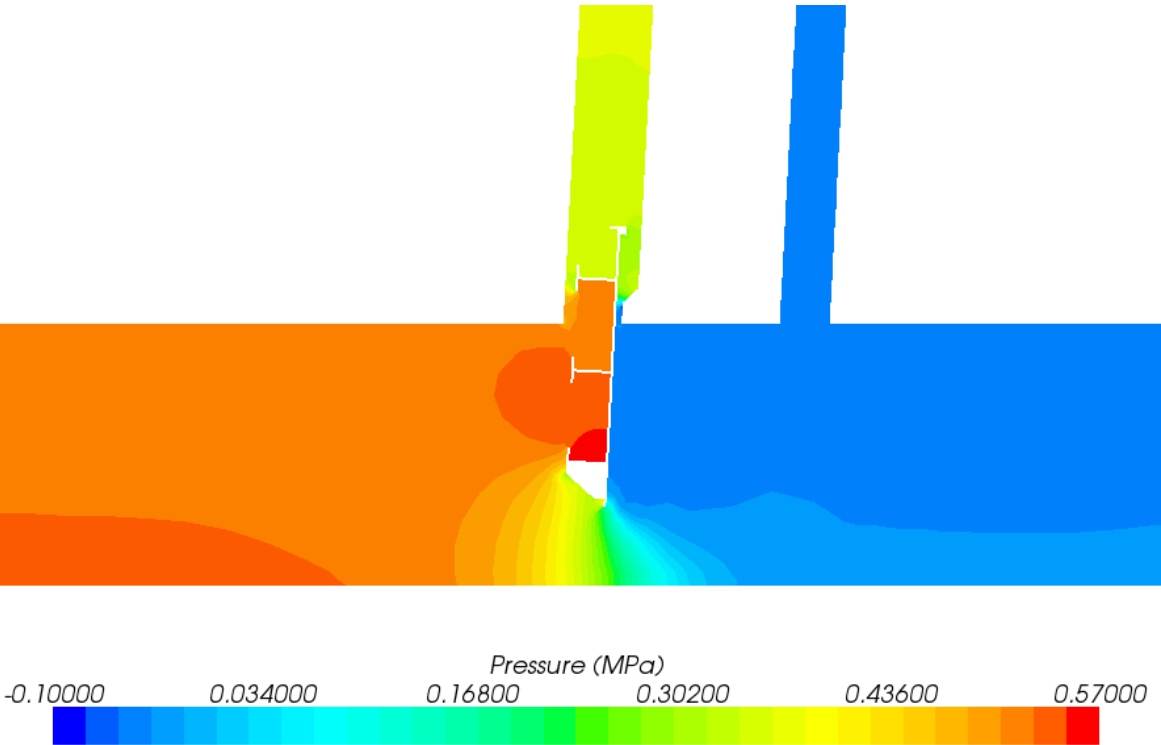
Pressão para a abertura de 10%



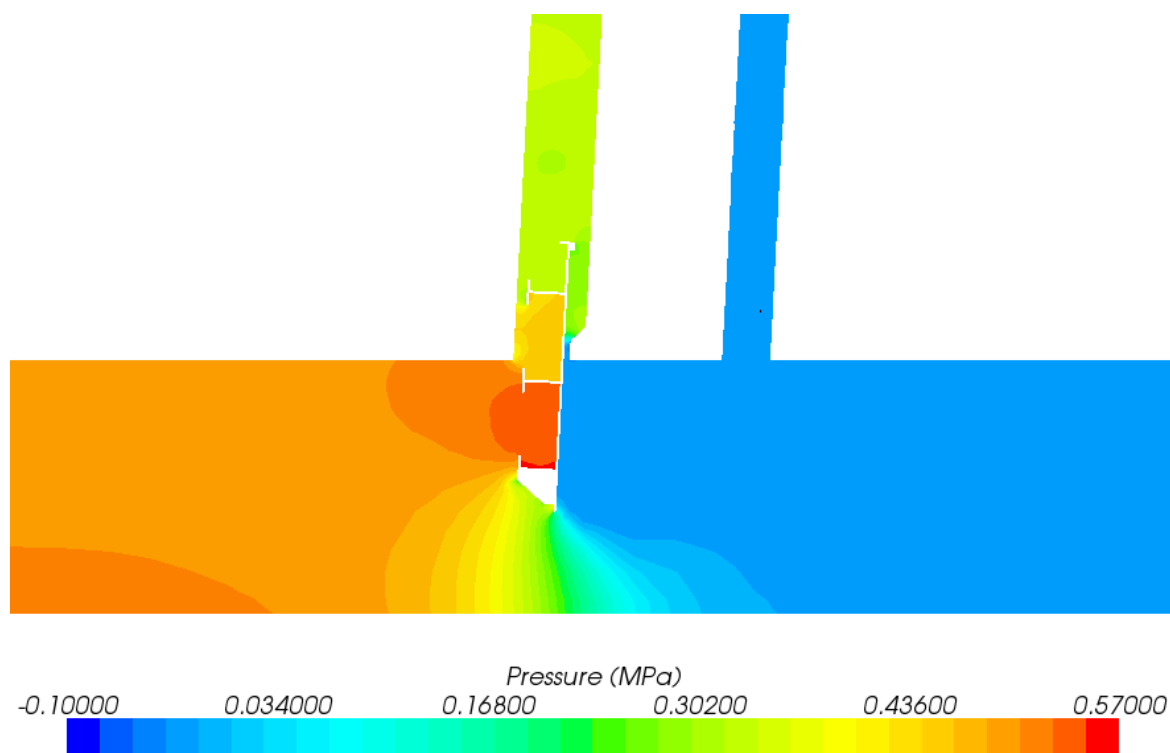
Pressão para a abertura de 15%



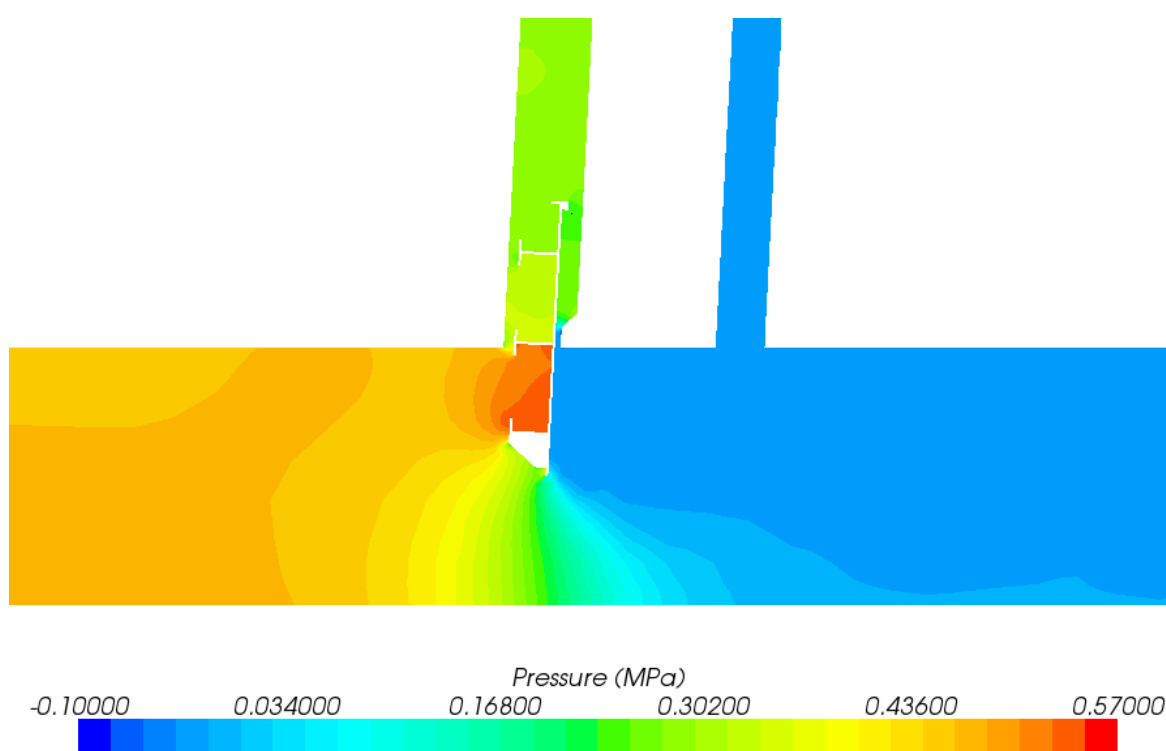
Pressão para a abertura de 20%



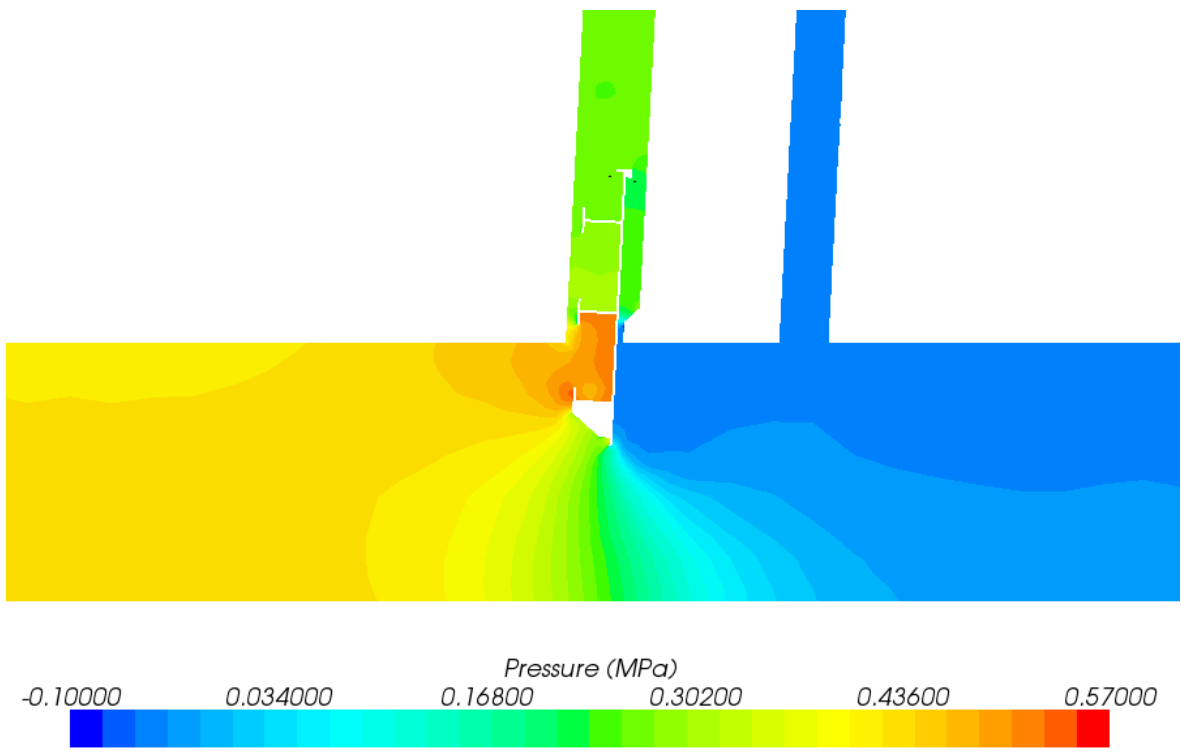
Pressão para a abertura de 30%



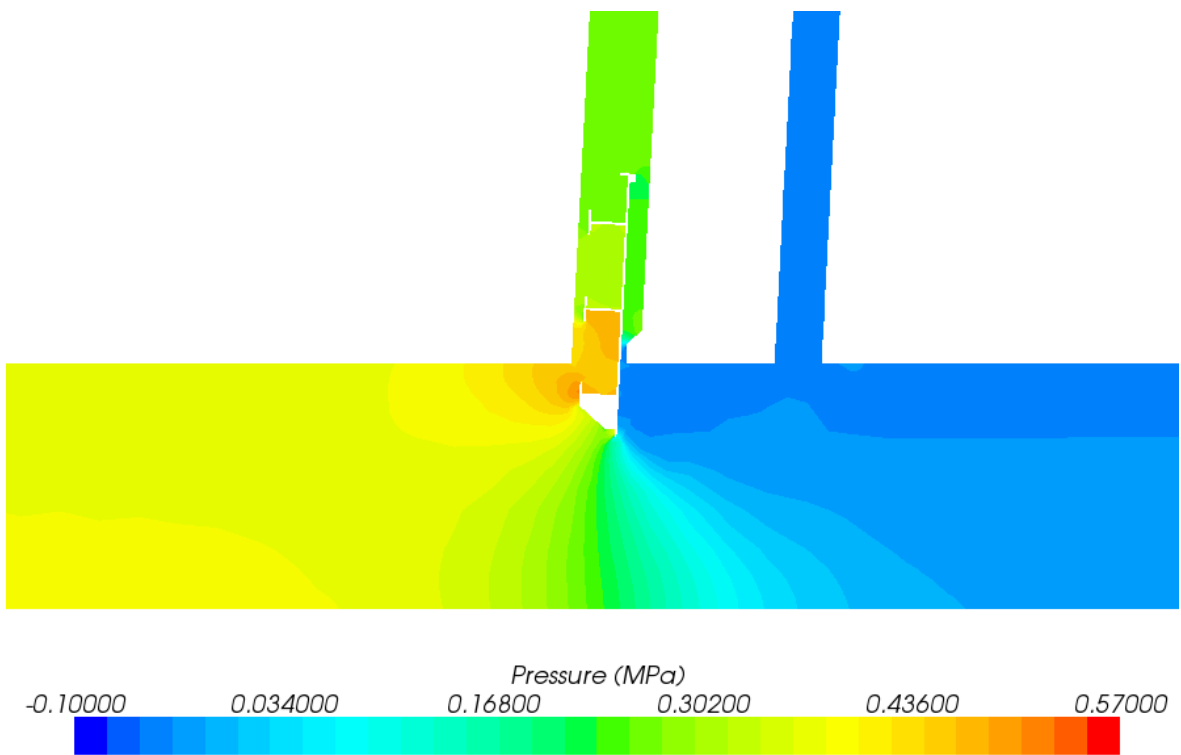
Pressão para a abertura de 40%



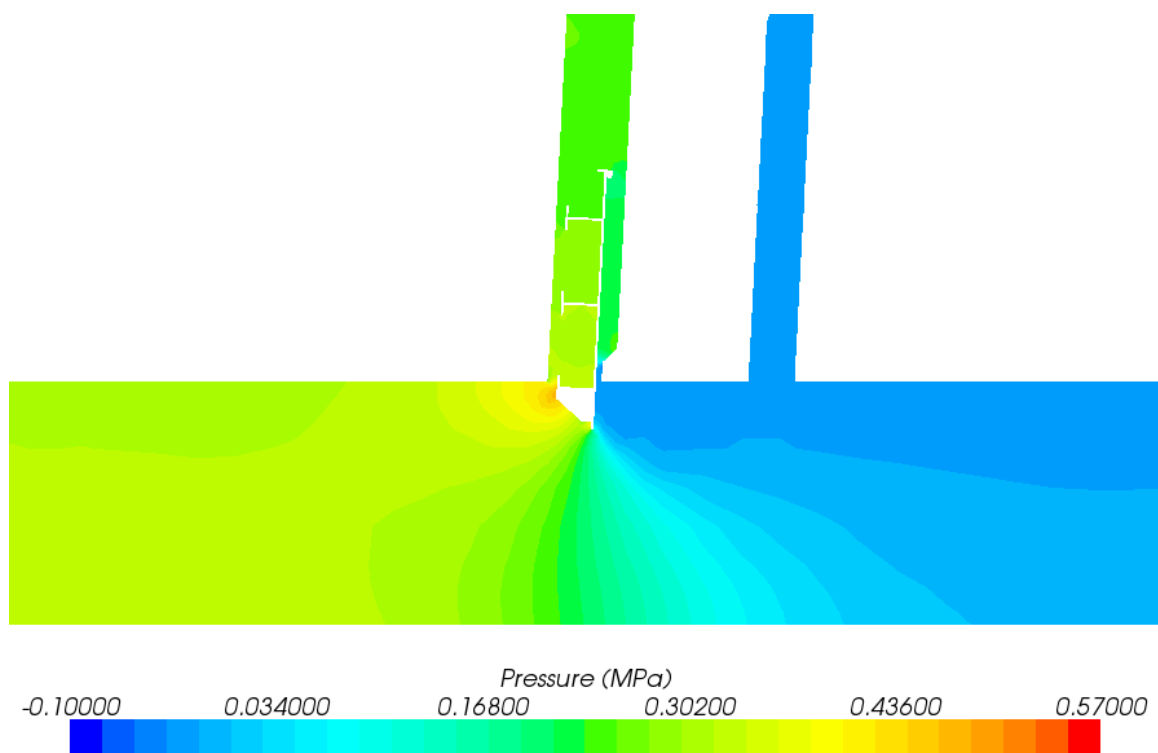
Pressão para a abertura de 50%



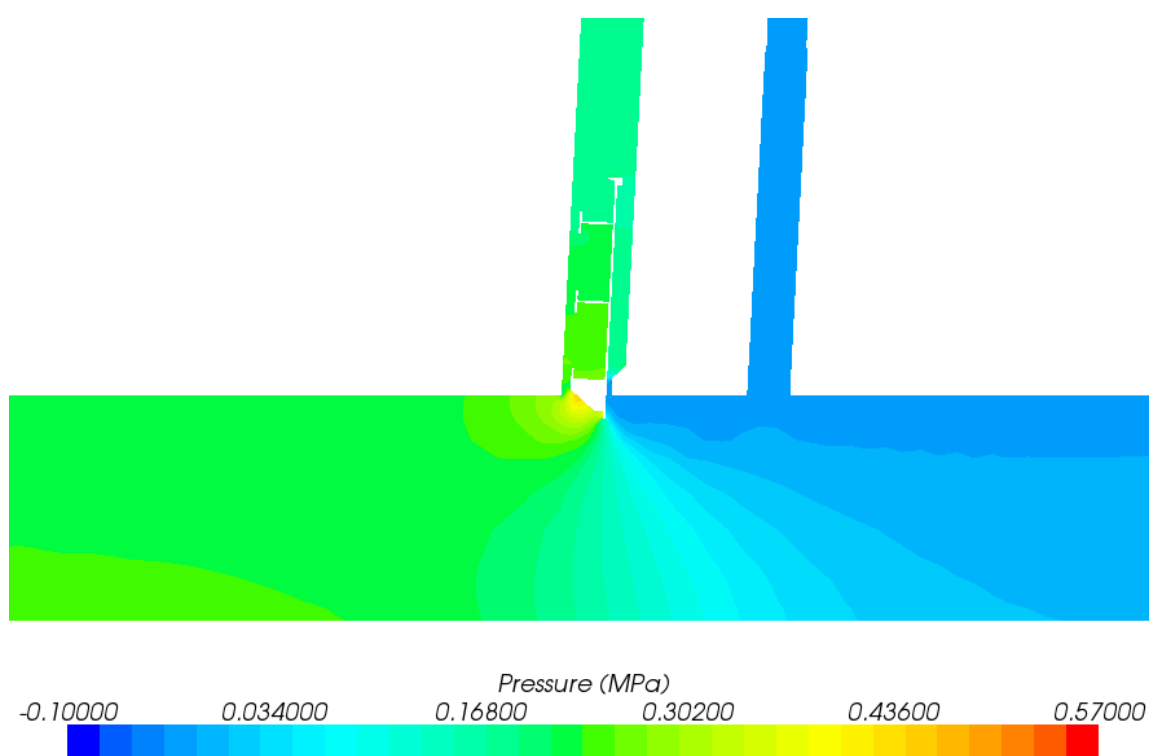
Pressão para a abertura de 60%



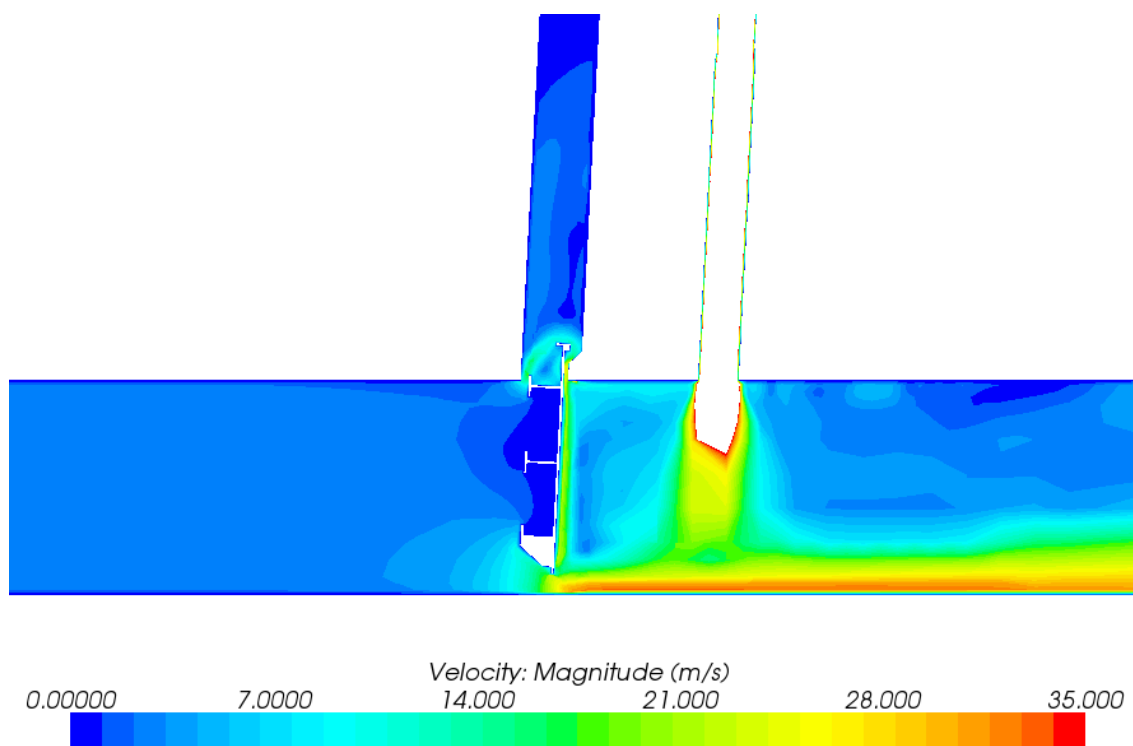
Pressão para a abertura de 70%



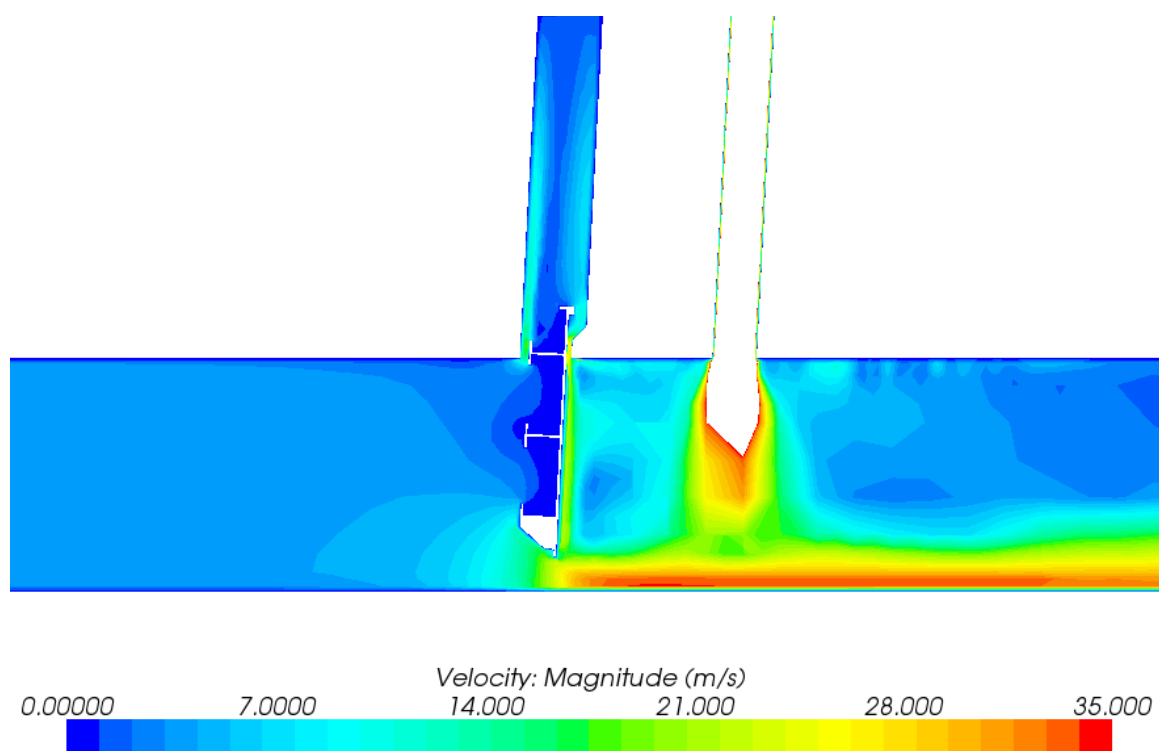
Pressão para a abertura de 80%



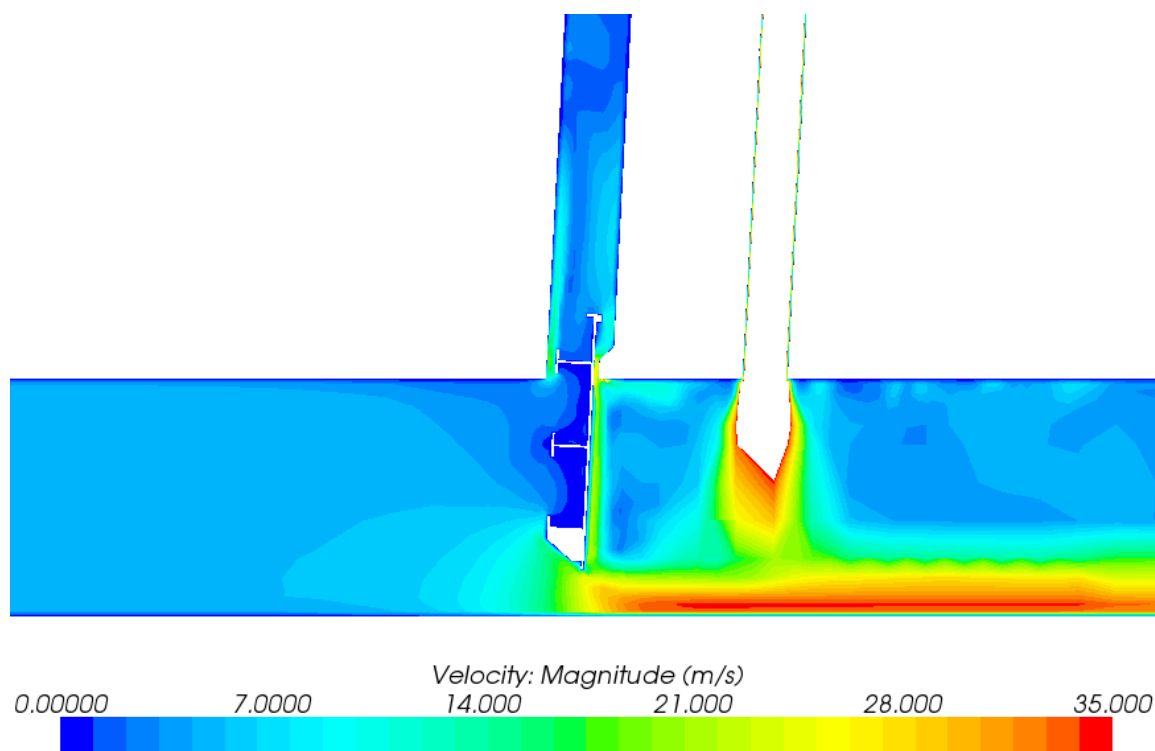
Pressão para a abertura de 90%



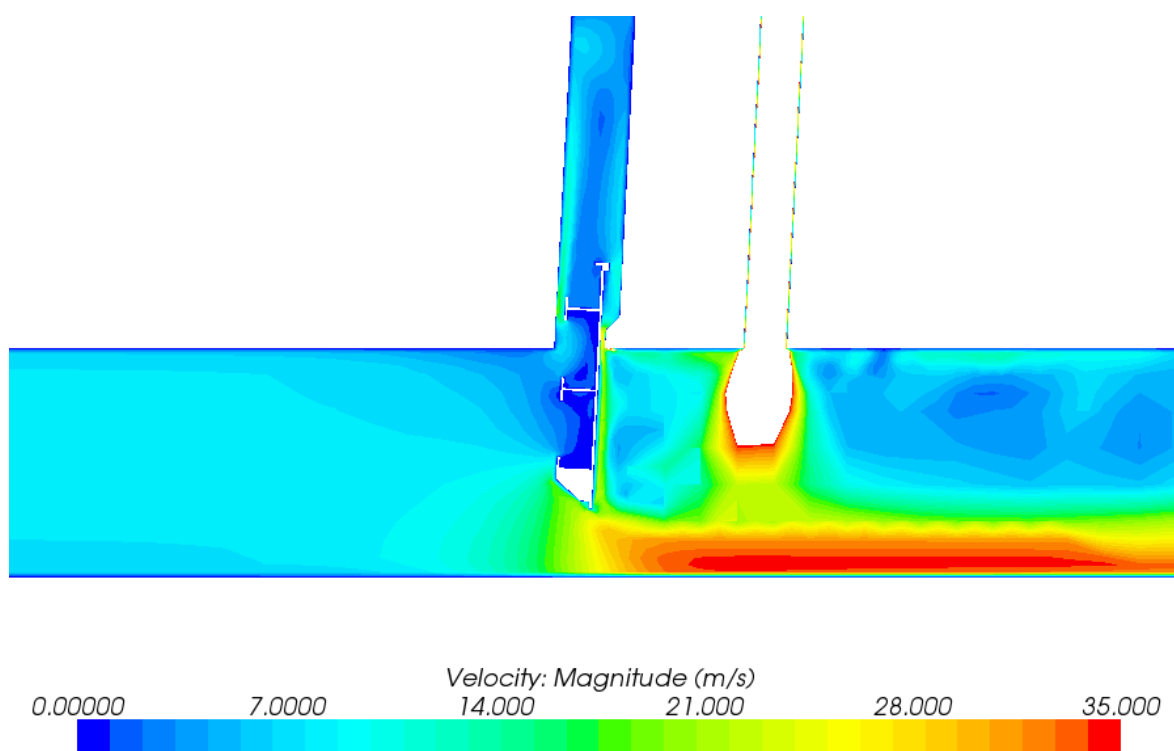
Velocidade para a abertura de 10%



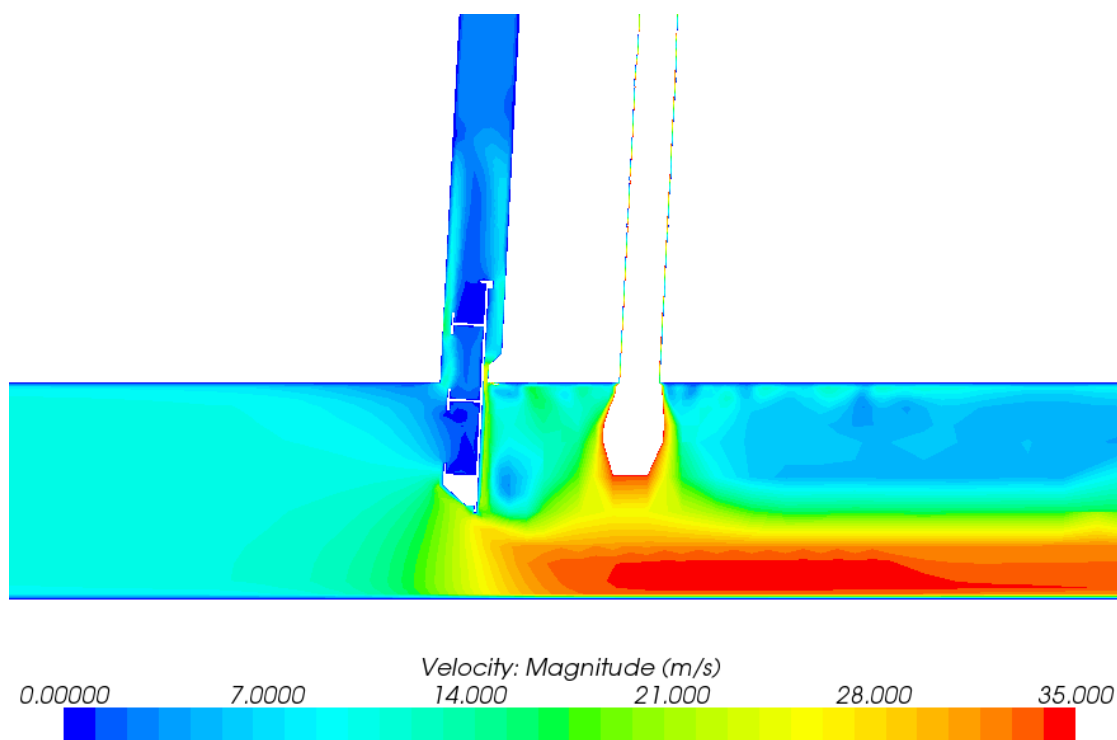
Velocidade para a abertura de 15%



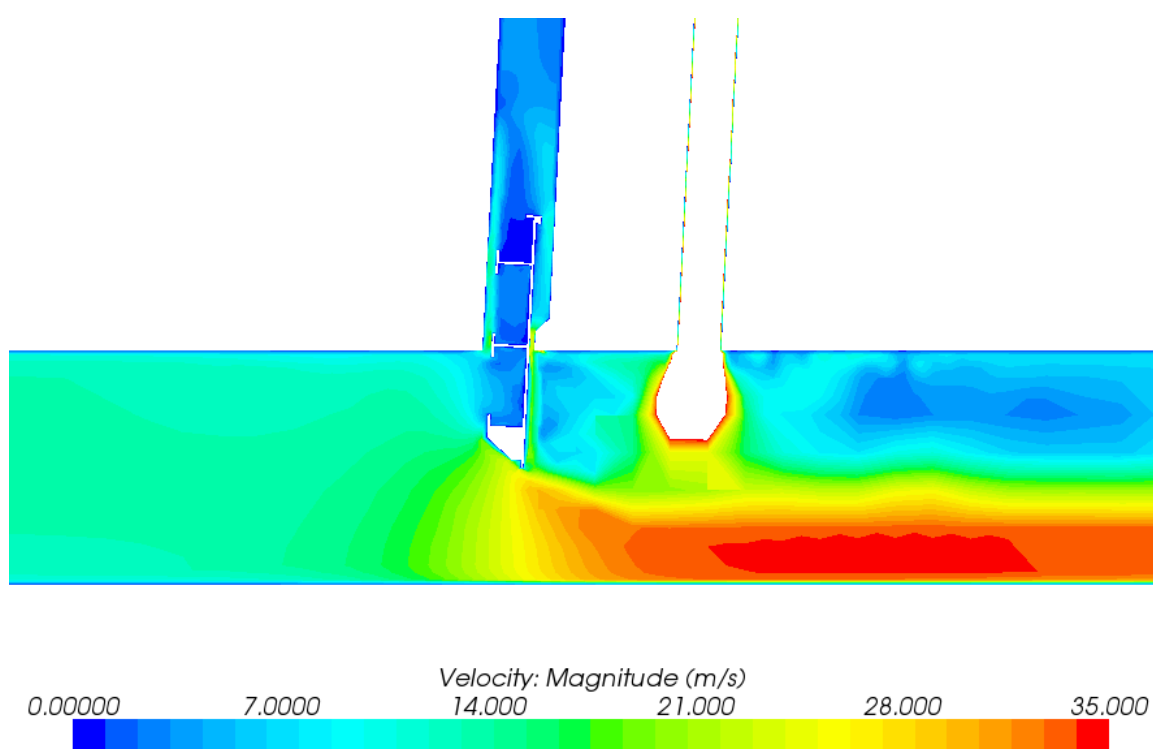
Velocidade para a abertura de 20%



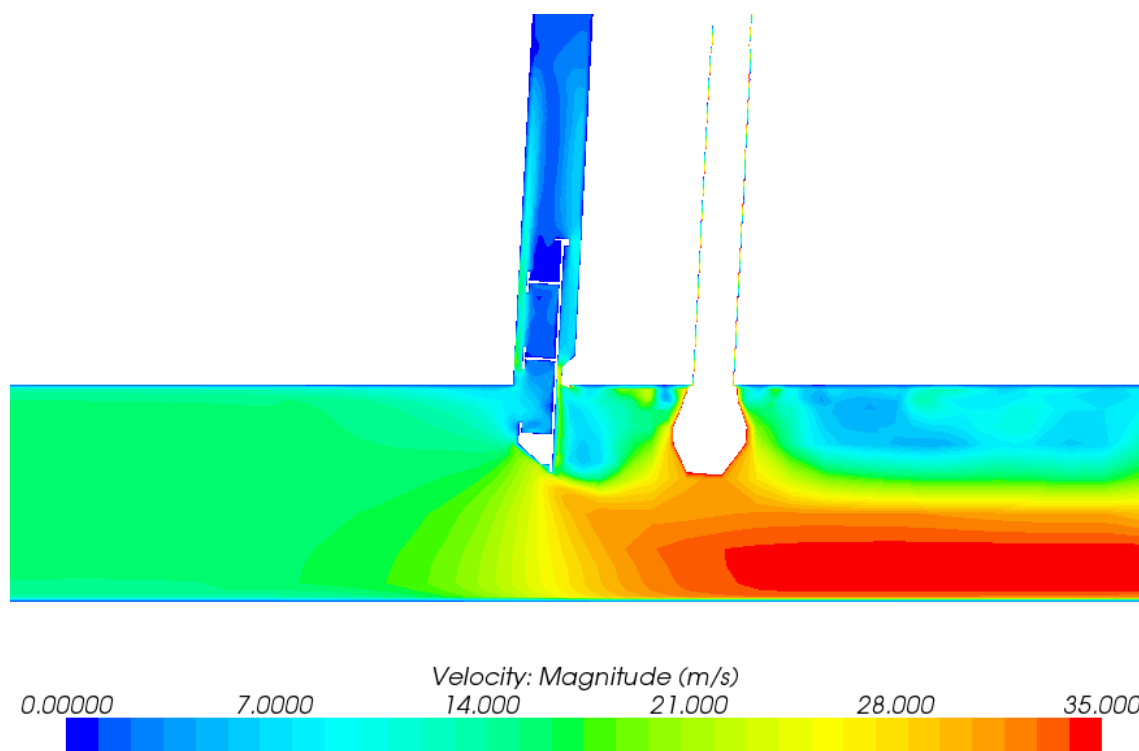
Velocidade para a abertura de 30%



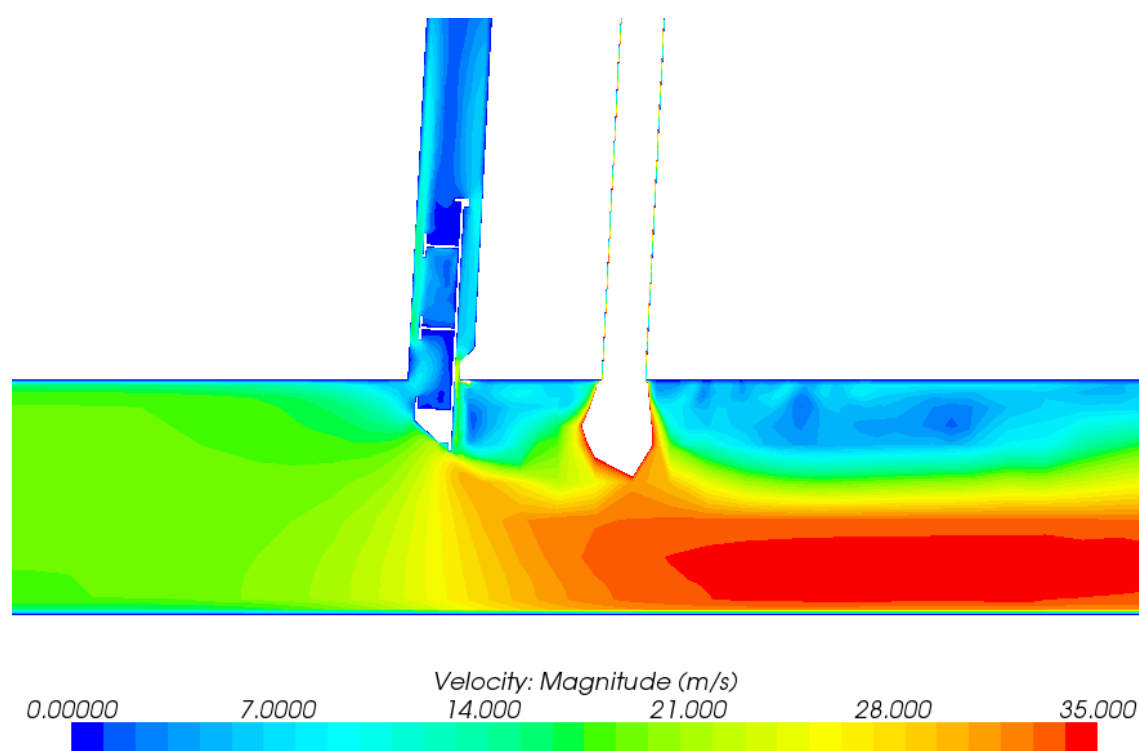
Velocidade para a abertura de 40%



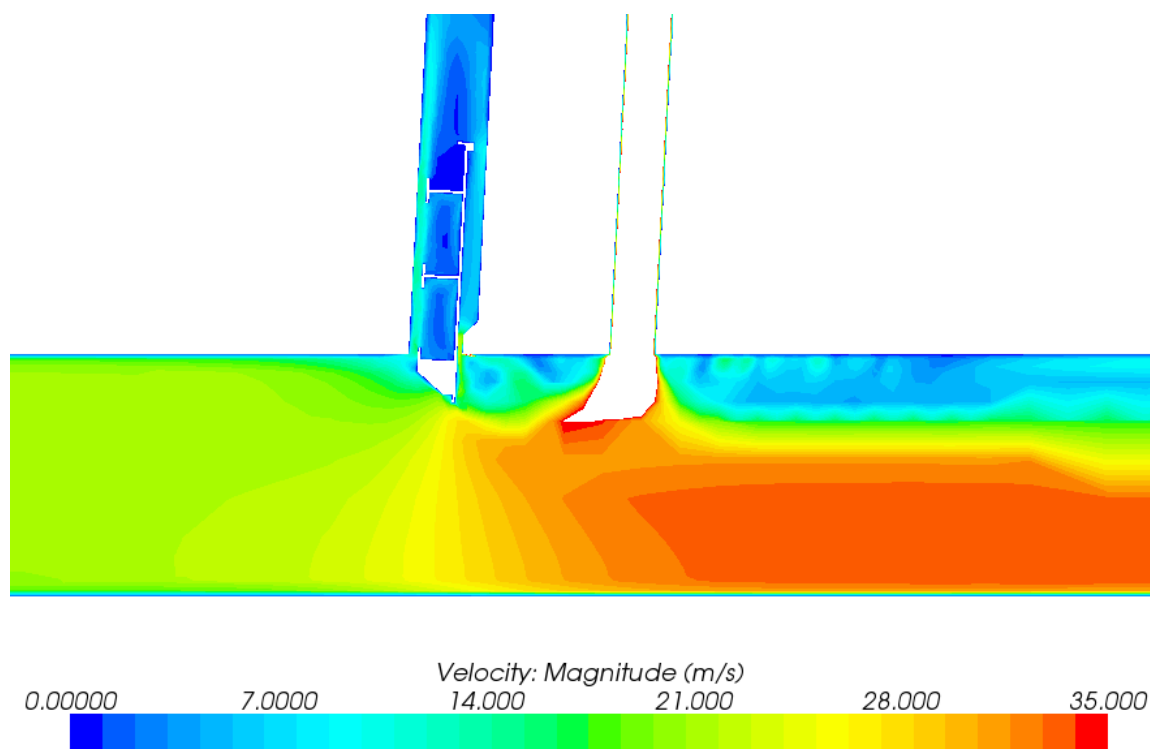
Velocidade para a abertura de 50%



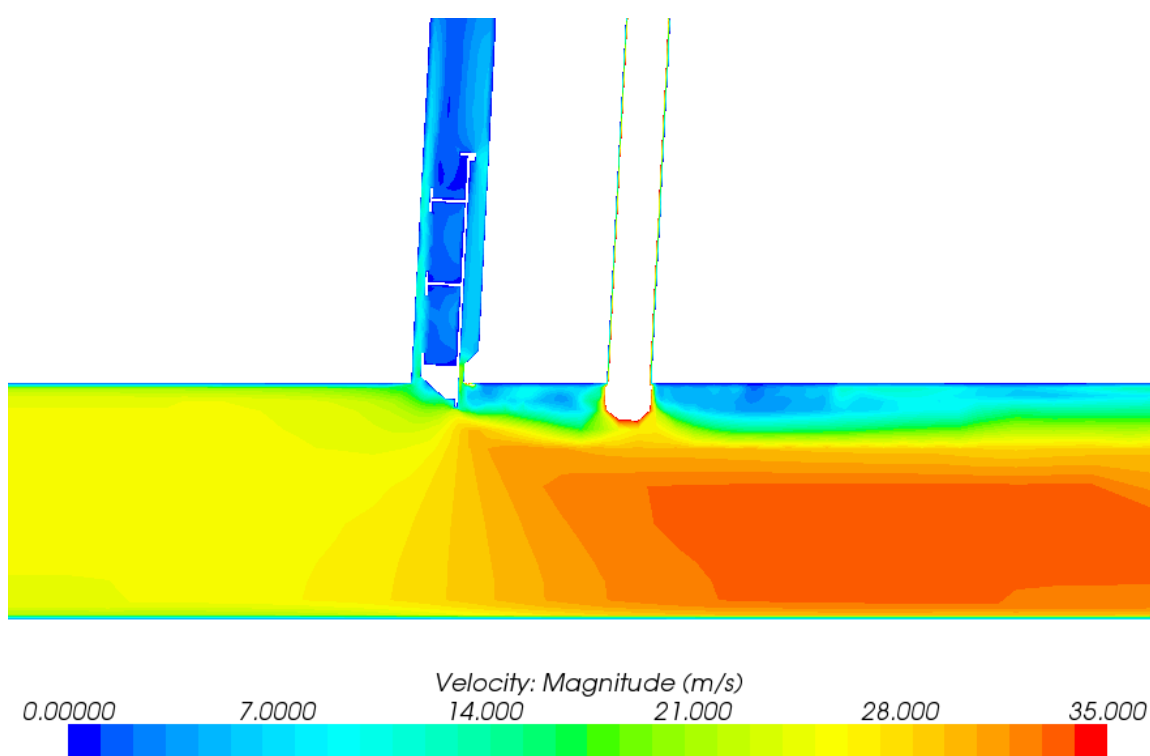
Velocidade para a abertura de 60%



Velocidade para a abertura de 70%



Velocidade para a abertura de 80%



Velocidade para a abertura de 90%
